

Aus dem Fachbereich Medizin der Philipps Universität Marburg

Klinik für Anästhesie und Intensivtherapie

Geschäftsführender Direktor: Professor Dr. med Hinnerk Wulf

Zentrum für Notfallmedizin

Leiter: PD Dr. med Clemens Kill

**Carboxyhämoglobin nach Brandgasexposition:
Eine Untersuchung zur
postexpositionellen Belastung
von Feuerwehreinsatzkräften**

Inaugural-Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades

der gesamten Humanmedizin

dem Fachbereich Medizin der Philipps-Universität Marburg

vorgelegt von

Alina Pfefferkorn aus Einbeck

Marburg, 2014

Angenommen vom Fachbereich Medizin der Philipps-Universität Marburg am:

Gedruckt mit Genehmigung des Fachbereichs.

Dekan: Herr Prof. Dr. H. Schäfer

Referent: Herr PD Dr. C. Kill

1. Korreferent: Herr PD Dr. M. Henke

I Inhaltsverzeichnis

I	Inhaltsverzeichnis	3
1	Einleitung	6
1.1	Aufgaben der Feuerwehr.....	6
1.2	Sonderfall: Brände in geschlossenen Räumen.....	6
1.3	Gefährdung der Einsatzkräfte	7
1.4	Ziel der Studie.....	8
2	Grundlagen.....	9
2.1	Atenschutzgeräteträger: Ausstattung und Ausbildung	9
2.1.1	Ausstattung der Atemschutzgeräteträger	9
2.1.2	Ausbildung der Atemschutzgeräteträger.....	12
2.1.3	Brandsimulationscontainer	14
2.2	Kohlenstoffmonoxid: Entstehung und Wirkung	16
2.2.1	Entstehung von Kohlenstoffmonoxid bei Zimmerbränden.....	16
2.2.2	Wirkung von CO im menschlichen Körper	17
2.2.3	Messung von COHb mittels Pulsoxymetrie.....	31
3	Erarbeitung der Forschungsfragen.....	37
4	Material und Methode.....	39
4.1	Studiendesign	39
4.1.1	Art der Studie	39
4.1.2	Beschreibung des Untersuchungsaufbaus	39
4.2	Messinstrumente	40
4.2.1	Messgerät	40
4.2.2	Fragebogen	41
4.3	Statistische Verfahren zur Datenauswertung	43
5	Ergebnisse	44
5.1	Beschreibung des untersuchten Kollektivs	44
5.2	Messwerte der Übungsgruppe	46

I Inhaltsverzeichnis	4
5.2.1 COHb-Werte Nichtraucher	46
5.2.2 COHb-Werte Raucher	48
5.2.3 COHb-Werte im zeitlichen Verlauf	51
5.2.4 Weitere quantitative Daten	53
5.2.5 Qualitative Daten	54
5.2.6 Symptome.....	56
5.3 Messwerte der Realeinsatzgruppe.....	56
5.3.1 COHb-Werte Nichtraucher	57
5.3.2 COHb-Werte Raucher	58
5.3.3 COHb-Werte im zeitlichen Verlauf	60
5.3.4 Weitere quantitative Daten	61
5.3.5 Qualitative Daten	62
5.3.6 Symptome.....	65
5.4 Hypothesentests	66
5.4.1 Vergleich der Einsatzszenarien.....	66
5.4.2 Vergleich der Maskentypen.....	68
5.5 Zusammenfassung der Ergebnisse	68
6 Diskussion.....	70
6.1 Limitationen	70
6.1.1 Methodische Diskussion.....	70
6.2 Demographische Daten.....	74
6.3 Messwerte	75
6.3.1 Erhöhte COHb-Werte und ihre Ursachen	75
6.3.2 Unterschiede zwischen Übung und Realeinsatz	81
6.3.3 Unterschiede zwischen Maskentypen.....	82
6.3.4 Kardiovaskuläre Parameter.....	82
7 Schlussbetrachtung	85
Zusammenfassung.....	87
II Literaturverzeichnis	91

I Inhaltsverzeichnis	5
III Abbildungsverzeichnis	99
Anhang	102

1 Einleitung

1.1 Aufgaben der Feuerwehr

Jedes Jahr kommt es in der Bundesrepublik Deutschland zu etwa 200.000 Brandereignissen in privaten Haushalten. In nur 5% der Fälle können diese ohne fremde Hilfe gelöscht werden [71]. Die Brandbekämpfung ist in Deutschland traditionell Aufgabe der Feuerwehren. Dabei unterscheidet man öffentliche von nicht-öffentlichen Feuerwehren. Zu den öffentlichen Feuerwehren gehören die Freiwilligen Feuerwehren und die Pflichtfeuerwehren. Nicht-öffentliche Feuerwehren sind Berufs-, Werk- und Betriebsfeuerwehren. Von den 1.342.513 deutschen Feuerwehrangehörigen engagieren sich 77% ehrenamtlich in Freiwilligen Feuerwehren, je rund 2% arbeiten in Berufs- und Werkfeuerwehren und rund 19% sind Mitglied einer Jugendfeuerwehr. [22]

Obwohl sich die Hauptaufgabe der Feuerwehr in den letzten Jahrzehnten mehr und mehr von der Brandbekämpfung zur technischen Hilfeleistung verlagert hat, bleibt die Brandbekämpfung dennoch ein wichtiger Teil der Aus- und Weiterbildung eines jeden Feuerwehrangehörigen [70].

Mit den sich ständig verbessernden technischen Voraussetzungen ändern sich, neben der Einsatztaktik, auch die Einsatzverfahren zur Brandbekämpfung der Feuerwehr. So schien es beispielsweise vor wenigen Jahrzehnten noch unmöglich, Brände direkt im Gebäudeinneren zu löschen. Heute ist der Innenangriff, ein Vorgehen, bei dem die Einsatzkräfte in das Innere eines Gebäudes eindringen um dort gezielt ein Löschmittel einzusetzen, ein Standardeinsatzverfahren der modernen Brandbekämpfung.

Im Gegensatz zu Brandereignissen im Freien herrschen bei Feuern in geschlossenen Räumen besondere Bedingungen vor. Hohe Temperaturen, schlechte Sicht und toxischer Brandrauch bestimmen die Einsatzsituation. Diese müssen bei der taktischen Einsatzplanung berücksichtigt werden. Dabei ist zu beachten, dass verbesserte technische Entwicklungen nicht nur neue Einsatztaktiken ermöglichen, sondern gleichermaßen auch höhere Anforderungen an den einzelnen Feuerwehrmann stellen.

1.2 Sonderfall: Brände in geschlossenen Räumen

Durch moderne Wärmeisolierungen, mehrfach verglaste Fenster und Brandschutztüren kommt es heute nur noch selten zur Ausbreitung eines Schadensfeuers auf ein gesamtes Gebäude. Ein Durchdringen des Feuers an die Gebäudeaußenseite in frühen

Brandphasen wird so gut wie nicht mehr beobachtet. Vielmehr bleibt die Brandausbreitung lange auf einen oder wenige Räume begrenzt [26].

Kommt es in abgeschlossenen Räumen zum Ausbruch eines Feuers, so ist, durch mangelnde Belüftung, nach kurzer Zeit der vorhandene Luftsauerstoff aufgebraucht. Ohne die ständige Zufuhr von Sauerstoff verbrennen viele Stoffe nur unvollständig. Dies beeinflusst die Zusammensetzung und die Toxizität des Brandrauches. Der Brandrauch ist ein Gemisch aus Partikeln, lungengängigen Aerosolen und toxischen Gasen. Bei Letzteren handelt es sich hauptsächlich um Kohlenstoffmonoxid (CO), Zyanide und Schwefelverbindungen. Eine weitere Steigerung der Rauchtoxizität entsteht durch die Verwendung künstlicher Baustoffe, die leichter entflammbar sind und zwei- bis dreimal schneller und heißer verbrennen als herkömmliche Baumaterialien. Den höchsten gesundheitsgefährdenden Stellenwert im Rauchgas haben Zyanide und CO. Typische kohlenstoffhaltige Substanzen, aus denen CO entstehen kann, finden sich in modernen Haushalten in großer Menge und Variabilität. Die Hauptentstehungsquellen sind dabei Zellulose und Polyvinylchlorid, da diese unter anderem zur Herstellung von Elektrogeräten und in den Polstern von Sitzmöbeln verwendet werden [52].

1.3 Gefährdung der Einsatzkräfte

Auch wenn sich die technischen Möglichkeiten der modernen Brandbekämpfung stetig verbessern, kommt es doch in jedem Jahr zu einer Vielzahl von Rauchgasintoxikationen in Deutschland [52, 71].

Die Gefährdung durch toxische Brandgase spielt nicht nur für die Opfer eines Brandes eine entscheidende Rolle, sondern auch für die Einsatzkräfte, die zu ihrer Rettung eingesetzt werden. Diese Aufgabe wird in den allermeisten Fällen von Atemschutzgeräteträgern der Feuerwehr wahrgenommen. Diese sind bei ihrer Arbeit im Brandraum durch spezielle Schutzkleidung und ein umluftunabhängiges Atemschutzgerät vor Rauch und Feuer geschützt. Doch auch die Schutzausrüstung verhindert nicht, dass immer wieder Feuerwehrangehörige durch den Brandrauch verletzt werden. In den Jahren 2005 bis 2009 sind in Deutschland 107 Feuerwehrleute im Einsatz durch giftige Stoffe verletzt worden [23]. Erhebungen durch die Feuerwehrunfallkassen der einzelnen Bundesländer verdeutlichen diese Problematik: Sachsen (2000-2010): 330 Fälle in denen Einsatzkräfte durch Atemgifte zu Schaden kamen, Sachsen-Anhalt (2009): ca. 20 bis 30 Fälle von Rauchgasvergiftungen bei

Feuerwehrangehörigen, Baden-Württemberg (2008): 90 bis 100 Fälle von Rauchgasvergiftungen im Einsatz [30, 33, 71].

Seit 2005 sind in Deutschland vier Atemschutzgeräteträger durch Rauchgasvergiftungen im Einsatz tödlich verunglückt [4, 41].

1.4 Ziel der Studie

Trotz der Vielzahl der jährlichen Unfälle, die deutsche Feuerwehrunfallkassen registrieren, gibt es keine verlässliche Aussage über die Gefährdung von Atemschutzgeräteträgern durch das CO im Brandrauch. Da es bei der Brandbekämpfung fast immer zu einer Exposition der Einsatzkräfte gegenüber Brandrauch und damit auch gegenüber CO kommt, sollen in der vorliegenden Inauguraldissertation physiologische Parameter von Feuerwehrangehörigen erhoben werden, die im Rahmen einer Brandbekämpfung unter Atemschutz durch eine CO-Belastung des Körpers entstehen können. Des Weiteren werden Vitalparameter registriert, die Aufschluss über das körperliche Wohlbefinden der zu untersuchenden Teilnehmer geben. Darüber hinaus werden weitere Daten zum Verhalten im Brandeinsatz erfragt. Ein besonderes Augenmerk liegt dabei auf Verhaltensweisen, welche die Aufnahme von CO trotz Tragens eines Atemschutzgerätes verursachen können. Als Ziel der Erhebung soll festgestellt werden, ob es bei Feuerwehrangehörigen, trotz einer hochwertigen persönlichen Schutzausrüstung, zu erhöhten körperlichen Parametern kommt, die Aufschluss über gesundheitlich relevante Auswirkungen der CO Belastung geben können. Aus der vorliegenden Studie heraus sollen potentielle Gefahren für Angehörige der Feuerwehr ermittelt, und gegebenenfalls Maßnahmen zur Verbesserung der persönlichen Sicherheit der Einsatzkräfte entwickelt werden.

2 Grundlagen

2.1 Atemschutzgeräteträger: Ausstattung und Ausbildung

2.1.1 Ausstattung der Atemschutzgeräteträger

Damit ein Feuerwehrangehöriger bei der Brandbekämpfung im Inneren eines brennenden Gebäudes geschützt ist, benötigt er eine besondere Schutzausrüstung. Diese reduziert die Gefährdung durch thermische Belastungen (Temperaturen bis zu 1000° Celsius) und verhindert die Inkorporation von toxischen Rauchgasen. Hierdurch wird das Arbeiten in dieser lebensgefährlichen Umgebung ermöglicht. Zu der persönlichen Schutzausrüstung eines Feuerwehrmitglieds in diesem Aufgabenbereich gehören: ein Feuerwehrhelm mit Nackenschutz, eine isolierende Feuerwehreinsatzhose und – einsatzjacke, sowie Feuerwehrsichthandschuhe, Sicherheitstiefel und ein Feuerwehrsicherheitsgurt. Die Einsatzkleidung für den Innenangriff besteht heute bei fast allen Feuerwehren aus schwer entflammaren synthetischen Aramid-Geweben, die sich durch eine hohe Hitzebeständigkeit auszeichnen und die Einsatzkräfte vor Verbrennungen schützen sollen. Zum Schutz vor Sauerstoffmangel oder Atemgiften müssen geeignete Atemschutzgeräte getragen werden. Diese und weitere Vorschriften zum Einsatz unter Atemschutz sind in der Feuerwehrdienstvorschrift 7 zu finden [34]. In diesem Aufgabenbereich wird die persönliche Schutzausrüstung durch ein Atemschutzgerät, einen Atemanschluss und eine Flammenschutzhaube ergänzt. Das Gesamtgewicht der persönlichen Schutzausrüstung eines Atemschutzgeräteträgers beträgt ca. 25 kg [28]. (siehe **Abbildung 1**).



Abbildung 1: komplette persönliche Schutzausrüstung,(Quelle: Feuerwehr Bad Gandersheim)

Atemschutzgeräte werden entsprechend ihres Funktionsprinzips in Filter- und Isoliergeräte unterteilt. Im Folgenden wird ausschließlich auf Isoliergeräte eingegangen, da nur diese für den Innenangriff zugelassen sind. Freiwillige Feuerwehren, Werk- und Berufsfeuerwehren nutzen Isoliergeräte, die unabhängig von der Umgebungsatmosphäre arbeiten. Sie bestehen aus einem tragbaren Luftversorgungssystem, der Pressluftflasche, und einem Atemanschluss, der das Gerät mit den Atemwegen des Benutzers verbindet. Diese Geräte führen einen begrenzten Luftvorrat mit, der für bis zu 30 Minuten ausreichen kann, und müssen nach jedem Einsatz erneut mit Luft befüllt werden [34]. Ausschließlich Grubenwehren arbeiten mit sehr wartungsintensiven Regenerationsgeräten, die die Ausatemluft auffangen, CO_2 chemisch binden und den metabolisierten Sauerstoff ersetzen.

Im Feuerwehrdienst werden als Atemanschlüsse ausschließlich Vollmasken verwendet. Dabei handelt es sich um Kunststoffmasken, die Augen, Nase, Mund und Kinn des Atemschutzgeräteträgers bedecken [14] (siehe Abbildung 2).



Abbildung 2: Atemschutzmaske (Quelle: Feuerwehr Kevelaer)

Die Maske wird über eine Gummibebänderung am Kopf befestigt. Eine Sichtsscheibe ermöglicht die Sicht nach außen. Die Maske ist gasdicht und wärmebeständig. Die Dichtigkeit am Übergang zwischen der Atemschutzmaske und dem Gesicht des Trägers wird durch einen Maskendichtrahmen aus Gummi gewährleistet. Dieser liegt bei richtigem Gebrauch gasdicht am Gesicht an. Einsatzkräfte mit Bart, tiefen Narben oder Schmuck im Bereich der Dichtung dürfen nicht eingesetzt werden, da die Dichtung bei ihnen nie vollständig anliegen kann [14, 34]. In seltenen Fällen werden sogenannte „Helm-Masken-Kombinationen“ eingesetzt, bei denen die Maske nicht am Kopf des Trägers befestigt wird, sondern gasdicht mit dem Helm verbunden werden kann. Im Inneren beider Maskensysteme befindet sich eine Innenmaske, die den technischen Totraum verringert. Sie verhindert außerdem, dass die Ausatemluft die Sichtsscheibe von innen beschlägt. Durch Ein- und ein Ausatemventil im Anschlussstück im vorderen Maskenteil wird gewährleistet, dass ausschließlich Luft aus der Pressluftflasche eingeatmet, und die verbrauchte Luft nach außen abgeleitet wird. Die Maske wird mittels einer atemgesteuerten Dosiereinrichtung, dem sogenannten Lungenautomaten, mit der Flasche verbunden. Der Lungenautomat regelt die Luftzufuhr aus der Pressluftflasche entsprechend dem Bedarf des Geräteträgers [14]. Sowohl den Lungenautomaten, als auch die dazugehörige Atemschutzmaske, gibt es in zwei unterschiedlichen Ausführungen. In der Normaldruckausführung erhält der Maskenträger allein durch seine Atemarbeit Luft aus der Pressluftflasche. Das Einatemventil im Lungenautomaten wird durch den Unterdruck beim Einatmen geöffnet und durch den Luftausstrom beim Ausatmen geschlossen. In der Überdruckvariante ist das Einatemventil ständig geöffnet und wird nur beim Ausatmen

geschlossen. Dadurch kommt es zu einem beständigen Luftstrom in die Maske, welcher einen beständigen Überdruck von wenigen mbar in der Maske erzeugt [27]. Ein Vorteil der Überdrucksysteme zeigt sich bei einer Maskenundichtigkeit: Ist eine Normaldruckmaske undicht, kommt es durch den beim Einatmen generierten Unterdruck zu einem Einströmen von Umgebungsluft an der Dichtung vorbei in die Maske. Die Folge sind Brandgase in der Maske. Im Überdrucksystem hingegen kommt es bei einer Undichtigkeit im Bereich der Dichtung durch den konstanten Überdruck in der Maske zu einem Ausströmen von Luft aus der Maske. Der Geräteträger ist so zusätzlich vor dem Einatmen von Brandgasen geschützt. Darin besteht jedoch auch ein Nachteil des Überdrucksystems. Kommt es bei einer Undichtigkeit zum Ausstrom von Luft aus der Maske, steht diese der Einsatzkraft nicht mehr zur Verfügung und die mögliche Einsatzdauer verkürzt sich.

Der zum Atmen benötigte Sauerstoff wird in Pressluftflaschen mitgeführt, die an einem Tragegestell befestigt werden (**siehe Abbildung 3**).

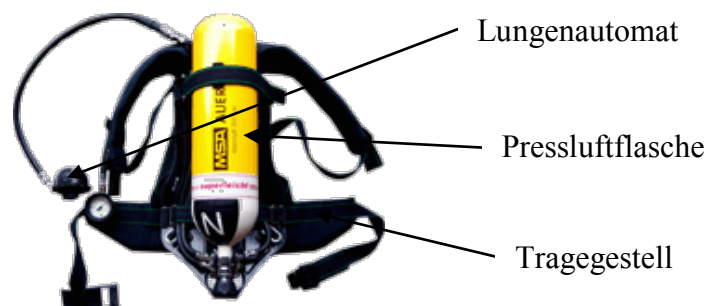


Abbildung 3: Pressluftflasche mit Tragegestell (Quelle: Feuerwehr Harsefeld)

In diesen Flaschen wird Außenluft mit einem Sauerstoffgehalt von 21% durch Drücke bis 300 bar komprimiert und abgefüllt. Dadurch werden bis zu 1600 Liter Luft auf ein Volumen von 6 Litern komprimiert und können mitgeführt werden. Ein Druckminderer, der den Luftdruck auf 6-9 bar mindert, verbindet die Pressluftflasche mit dem Lungenautomaten. Dadurch kann die Luft aus der Pressluftflasche eingeatmet werden [27]. Durch ein Manometer am Druckluftschlauch kann der Atemschutzgeräteträger zu jeder Zeit den aktuellen Luftdruck ablesen und somit die ihm verbleibende Luftmenge berechnen.

2.1.2 Ausbildung der Atemschutzgeräteträger

Um als Atemschutzgeräteträger eingesetzt werden zu können, sind neben der in 2.1.1. beschriebenen besonderen Schutzausrüstung eine spezielle Ausbildung zum Atemschutzgeräteträger und eine jährlich durchgeführte Weiterbildung erforderlich. Die

Form und der Inhalt der Aus- und Weiterbildung sind in Deutschland bundeseinheitlich in der Feuerwehrdienstvorschrift 7 zum Thema Atemschutz (FwDV 7) geregelt.

Im Einsatz unter Atemschutz ist der Geräteträger einer hohen körperlichen und psychischen Belastung ausgesetzt. Diese resultiert einerseits aus den thermischen Bedingungen (brandbedingte Temperaturen, die in den meisten Fällen noch durch eine Wasserdampfentwicklung verstärkt werden) und andererseits aus der zu verrichtenden körperlichen Arbeit. Vor der Ausbildung zum Atemschutzgeräteträger steht deshalb eine Untersuchung zur körperlichen Eignung für diesen Einsatz [31]. Deren Inhalt ist im Grundsatz G26.3 für Arbeitsmedizinische Vorsorgeuntersuchungen der Deutschen gesetzlichen Unfallversicherung vorgeschrieben. Jeder Atemschutzgeräteträger muss volljährig sein und sich bis zum Alter von 50 Jahren mindestens dreijährlich, danach jährlich, einer Tauglichkeitsuntersuchung unterziehen. Bei eingeschränkter Gesundheit oder Zweifeln an der körperlichen Eignung kann diese Untersuchung auch früher angeordnet werden [32]. Die G26.3 wird von Fachärzten für Arbeitsmedizin oder Ärzten mit der Zusatzbezeichnung Betriebsmedizin vorgenommen [31]. Neben einer Überprüfung des Hör- und Sehvermögens werden eine Überprüfung der Lungenfunktion sowie eine Untersuchung des Herz-Kreislauf-Systems in Form eines Belastungs-EKG vorgenommen. Dies dient dazu, einschränkende Erkrankungen frühzeitig zu erkennen und die körperliche Leistungsfähigkeit zu testen. Hierzu wird eine Fahrradergometrie durchgeführt. Männer bis zum 40. Lebensjahr werden ansteigend mit schließlich 3,0 Watt/kg Körpergewicht belastet, danach mit 2,1 Watt/kg. Für Frauen gelten 2,5 Watt/kg Körpergewicht. Zu keiner Zeit soll die Herzfrequenz dabei über 170 Schläge pro Minute ansteigen. Die so ermittelte Belastbarkeit ist als eine Mindestbelastbarkeit anzusehen, da die tatsächliche Belastung im Einsatz durch Hitze, zusätzliches Gewicht und die Ausschüttung von Stresshormonen um einiges höher liegen kann [1].

Während der Ausbildung wird die Handhabung und Kontrolle des Atemschutzgeräts und der Maske erlernt und geübt. Des Weiteren werden Einsatzgrundsätze für den Einsatz unter Atemschutz gelehrt. Im Laufe des Lehrgangs führen die Teilnehmer mehrere Übungen zur Orientierung und zur Testung der körperlichen und psychischen Belastbarkeit unter Atemschutz durch. Der Lehrgang wird mit einer Überprüfung der theoretischen und praktischen Kenntnisse und einer standardisierten Belastungsübung unter Atemschutz abgeschlossen. Die Belastungsübung muss in jährlichen Abständen wiederholt werden [34].

2.1.3 Brandsimulationscontainer

Wird die Feuerwehr zu einem Gebäudebrand gerufen, ist die Situation im Inneren desselben meist nur schwer einzuschätzen. Ein Atemschutzgeräteträger weiß im Moment des Vorgehens in ein brennendes Gebäude deshalb selten, was ihn im Inneren erwartet. Die Raumaufteilung, der Weg zum Brandort, die Art und Ausbreitung des Brandes sind nicht bekannt und die Sichtverhältnisse oft so schlecht, dass man nur wenige Zentimeter weit sehen kann. Die Temperatur nimmt in der Nähe des Feuers stetig zu, und zusätzlich zum Gewicht der persönlichen Schutzausrüstung trägt die Einsatzkraft den wassergefüllten Schlauch, Brechwerkzeug um den Weg frei zu räumen, und unter Umständen zusätzliche Ausrüstung zur Menschenrettung. Ein weiterer Stressor liegt oft in dem Wissen um die Gefährdung von Menschenleben. Um unter diesen Umständen effizient arbeiten zu können, ist eine hohe Einsatzroutine und Sicherheit erforderlich.

Um diese Routine für den Realeinsatz zu schaffen, ist man in den letzten Jahren vermehrt dazu übergegangen, Atemschutzgeräteträger möglichst realitätsnah auszubilden. Neben der technischen Ausbildung am und mit dem Gerät gibt es an vielen Standorten mittlerweile die Möglichkeit, eine sogenannte Wärmegewöhnung oder Heißausbildung durchzuführen. Dabei werden die Brandbekämpfung und das Verhalten im Brandeinsatz mit Hilfe echten Feuers geübt. Für diese Übungen gibt es eigens errichtete Brandhäuser, die eine Art Rohbau darstellen, der nur zu Ausbildungszwecken der Feuerwehr genutzt wird. Um möglichst viele Atemschutzgeräteträger realitätsnah ausbilden zu können, wird vermehrt dazu übergegangen, mobile „Brandhäuser“ aus Überseecontainern zu entwickeln. Diese können per LKW transportiert und auf unterschiedliche Arten zusammengebaut werden. In den meisten Fällen handelt es sich um einzelne Container, die einen Brandraum simulieren. Das den hier beschriebenen Messungen zu Grunde liegende System wird von der Firma Feurex betrieben. Bei diesem Containersystem können drei bis vier Container zu einer 4-Zimmerwohnung zusammengesetzt werden [26]. **Abbildung 4** zeigt eine Übersicht dieses Containersystems, den vorgesehenen Einsatzweg und einige Aufgaben, die während der Übung zu absolvieren sind.

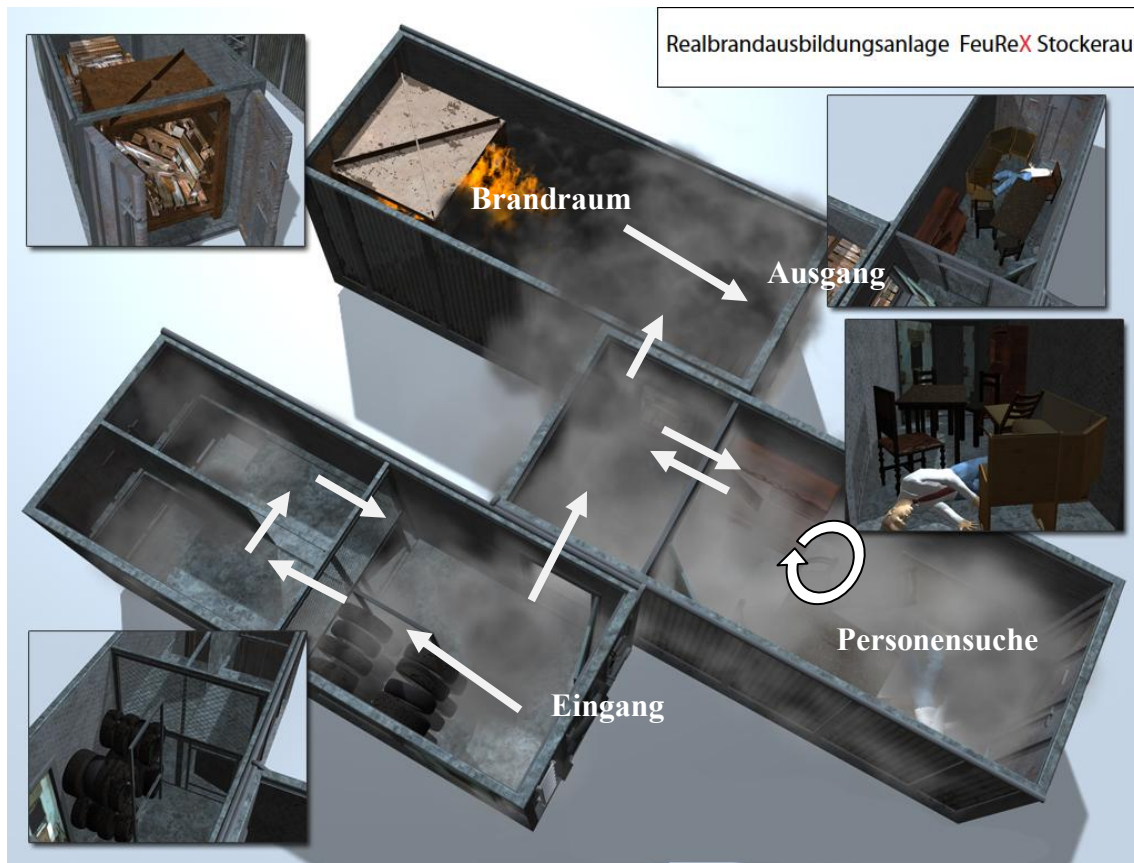


Abbildung 4: Wärmegeöhnungsanlage (Quelle: Feurex)

Das Feuer, das im Brandraum dieses Containersystems gelöscht werden soll, wird durch das Verbrennen von Holz entfacht. Eine Alternative zur Holzbefuerung ist eine gasbefeuerte Anlage. Gasbefeuerte Anlagen haben den Vorteil, dass das entzündete Feuer über das An- und Abstellen des Gases für den Übungsleiter leicht zu kontrollieren ist. Feststoffbetriebene Anlagen müssen abgelöscht werden und erschweren im Falle unvorhergesehener Notlagen das schnelle Eingreifen. Sie haben jedoch den Vorteil sehr viel näher an der Einsatzrealität zu liegen als gasbefeuerte Anlagen. Nur in feststoffbetriebenen Übungsszenarien kommt es zur Entwicklung von Brandrauch und zu Temperaturen, die denen im tatsächlichen Innenangriff gleichen [26].

Für die Ausbildung der Atemschutzgeräteträger wird zunächst ein Feuer im Brandraum entzündet. In Trupps von zwei bis drei Einsatzkräften betreten die Atemschutzgeräteträger die Übungsanlage und nähern sich dem Brandraum. Dabei werden Einsatztechniken unter realen Bedingungen trainiert. Im Brandraum angekommen werden verschiedene Techniken zum Löschen eines Feuers geübt. Ist dies gelungen, endet die Übung und die Anlage wird wieder verlassen. Ein kompletter

Durchgang dauert etwa 20 Minuten. Diese Art der Ausbildung wurde in den untersuchten Kohorten als eine optimale Ausbildungsergänzung gewertet [26].



Abbildung 5: Eindruck aus dem Brandraum (Quelle: Feurex)

2.2 Kohlenstoffmonoxid: Entstehung und Wirkung

2.2.1 Entstehung von Kohlenstoffmonoxid bei Zimmerbränden

Eine Verbrennung ist eine Oxidation, die unter Abgabe von Licht und Wärme stattfindet. Als Oxidationsmittel dient in den meisten Fällen Sauerstoff. Dieser verbindet sich unter Abgabe von Energie mit seinem Reaktionspartner. Oxidationen können mit sehr hohen Geschwindigkeiten ablaufen, z.B. bei einer Explosion, oder mit sehr langsamer Reaktionsgeschwindigkeit, z.B. beim Verrosten von Metall. Verbrennungen in Form eines Feuers erfordern ausreichend brennbares Material, Luftsauerstoff und eine Temperatur über der Zündtemperatur. Stimmt dieses Mischungsverhältnis, werden alle freien Oxidationsstellen eines Stoffes mit Sauerstoff besetzt. Reicht die vorhandene Menge Sauerstoff nicht aus, bleiben Sauerstoffbindungsstellen unbesetzt und man spricht von einer unvollständigen Verbrennung. Bei der vollständigen Verbrennung von Kohlenstoff entsteht Kohlenstoffdioxid (CO_2). Bei der unvollständigen Verbrennung hingegen kommt es zur Bildung des farb- und geruchlosen Gases Kohlenstoffmonoxid (CO). Nur bei Bränden, die im Inneren eines Gebäudes unter geringer Luftzufuhr stattfinden, kommt es zur Entstehung von CO . Bei Feuern im Freien ist die Fraktion des gebildeten CO s vernachlässigbar gering [48]. Ein weiterer Grund, warum die CO -Fraktion nur in geschlossenen Räumen eine Rolle spielt, ist die geringe Dichte von CO im Vergleich zu Sauerstoff. Im Freien steigt CO auf und verflüchtigt sich mit dem Brandrauch. In geschlossenen Räumen ist dies nicht möglich. Es kommt somit zu einem ständig steigenden CO -Gehalt der Umgebungsluft [52].

Kohlenstoff ist der wichtigste Bestandteil aller organischen Verbindungen und findet sich in modernen Haushalten in unzähligen Materialien wieder. In den meisten Fällen handelt es sich dabei um Zellulose oder Polyvinylchlorid. Die Materialien sind Bestandteile von Holz, Papier und Baumwolle, beziehungsweise von Polsterungen, Isolationen, Möbelbezügen, Rohranstrichen, Wand- und Bodenfarben und Textilien [52]. Kommt es bei einem Zimmerbrand zum Abbrennen solcher Materialien, entstehen immer CO_2 und CO . Weitere Quellen, aus denen eine CO -Bildung resultieren kann, sind Abgase in schlecht belüfteten Garagen, unzureichend gewartete Heizungen, die Öl, Kohle, Holz oder Kerosin verbrennen, oder ein retrograder Fluss durch verstopfte Abzüge in einigen Heizungen [54].

Eine Forschungsgruppe der Technischen Universität Lund, Schweden hat im Jahr 1993 unter Laborbedingungen untersucht, wie viel CO jeweils bei der Verbrennung handelsüblicher Haushaltswaren in geschlossenen Räumen entsteht. So erzeugt die Verbrennung von Bettzeug bis zu vier Liter CO pro Sekunde, die eines brennenden Sessels circa eineinhalb Liter pro Sekunde und eines brennenden Holzgarderobenständers bis zu zehn Liter CO pro Minute [82]. Der prozentuale CO -Anteil der Raumluft hängt somit sowohl von der Dauer des Brandes, als auch von der Größe des Raumes und der vorhandenen Luftmenge ab. Bei einem für die gleiche Studie nachgestellten Wohnzimmerbrand wurde der Raumluftgehalt von Kohlenmonoxid auf 10 Vol% beziffert [82]. Bereits ab einem Raumluftgehalt von 1 Vol% herrscht eine für den Menschen tödliche CO -Konzentration im Brandrauch [71]. Bereits etwa fünf Minuten nach Ausbruch eines Feuers können solche Werte erreicht werden. Dadurch beschränkt sich die verbleibende Zeit zur Flucht für im Brandraum befindliche Personen auf die ersten zwei bis vier Minuten nach Auftreten des Feuers [52].

2.2.2 Wirkung von CO im menschlichen Körper

2.2.2.1 Historie

Schon im antiken Griechenland war die schädliche Wirkung von Gasen, die bei einer unvollständigen Verbrennung entstehen, bekannt. Offene Kohlebecken wurden in gut belüfteten Räumen zum Heizen benutzt. In abgeschlossenen Räumen hingegen wurden mittels der CO Entstehung aus diesen Kohlebecken Kriminelle hingerichtet. Erstmalig isoliert wurde CO im Jahr 1776 in Frankreich. Ende des 19. Jahrhunderts entdeckte Claude Bernard die toxische Wirkung von CO und eine Interaktion mit Hämoglobin.

Haldane demonstrierte zur gleichen Zeit, dass hohe Sauerstoffpartialdrücke diese Interaktion beeinflussen können [72].

2.2.2.2 Physiologie

Im menschlichen Körper entsteht CO physiologischerweise durch den Abbau von Hämoglobin, Myoglobin und von Enzymen mit Hämgruppe, wie Peroxidase, Katalase oder Cytochrom c. Zu erhöhten endogenen CO-Werten kommt es deshalb bei Zuständen mit starker Häm- oder Myolyse. Endogenes CO wirkt als Signalmolekül im Rahmen von Entzündungen, als Proliferationssignal, aber auch als Signal der Apoptose. Des Weiteren geht man davon aus, dass CO als Neurotransmitter im zentralen Nervensystem fungieren kann [13].

Exogenes CO wird ausschließlich über die Atemwege in den menschlichen Körper aufgenommen [71]. Enthält die Umgebungsluft Anteile von CO, so wird dieses gemeinsam mit der Atemluft in die Lungen eingeatmet und gelangt in die Alveolen. Dort diffundiert CO entlang seines Konzentrationsgradienten über die alveoläre Membran in die Erythrozyten des Blutes in den Lungenkapillaren. Die Menge des diffundierenden Gases ergibt sich aus der jeweiligen Diffusionskapazität. Diese variiert mit der alveolären Austauschfläche, der Alveolendicke, der Löslichkeit des Gases im Blut, sowie dem jeweiligen Diffusionskoeffizienten [55]. O₂ und auch CO werden nach der Aufnahme in das alveoläre Blut sowohl physikalisch im Plasma gelöst, als auch an das erythrozytäre Transportprotein Hämoglobin gebunden. Hierbei wird die Bindung von CO gegenüber der Bindung von O₂ bevorzugt. Die Löslichkeit des O₂ im Blut ist nur sehr gering und so werden im Regelfall ca. 98,5% des aufgenommenen Sauerstoffs an Hämoglobin gebunden. Nach einer Kontaktzeit von ca. 0,1 Sekunden ist bereits so viel Sauerstoff in das Blut diffundiert, dass ein Ausgleich der Sauerstoffpartialdrücke auf beiden Seiten der Alveolarmembran erfolgt ist. Damit wird die Sauerstoffaufnahme durch die nachfließende Menge Blut, die für einen Gasaustausch bereitsteht, limitiert. Anders verhält sich die Aufnahme von CO in das Blutplasma. Die Löslichkeit des CO im Plasma ist geringfügig höher als die des Sauerstoffs. Etwa 10% des CO liegen in gelöster Form im Blutplasma vor, während ca. 90% sofort nach der Aufnahme in die Erythrozyten diffundieren um dort an Hämoglobin gebunden zu werden. Diese Diffusion erfolgt sehr viel langsamer als die des Sauerstoffs und die Einstellung eines Gleichgewichts zwischen den alveolären und kapillären Partialdrücken erfolgt sehr spät. Daraus ergibt sich, dass die Menge CO, die aufgenommen werden kann, nicht wie beim

Sauerstoff, von der Alveolarperfusion, sondern von der CO-Nettodiffusion abhängt [56, 71, 72]. Gemeinsam mit dem alveolären Blut gelangt das CO in den Körperkreislauf und von dort auch in extravasale Gewebe. In muskulärem Gewebe wird es an das Muskelprotein Myoglobin gebunden. Im nicht muskulären Gewebe hingegen liegt es ausschließlich in gelöster Form vor [16]. Die Elimination des CO aus dem Körper erfolgt ausschließlich über die Atemwege. Sie verläuft biphasisch. In der ersten Phase wird ein Teil des COs im venösen Blut schnell an die Lunge abgegeben und abgeatmet. Ein anderer Teil wird in intrazelluläre Kompartimente verlagert. In der zweiten Phase kommt es zur langsamen Rückverlagerung des COs aus dem Gewebe ins Blut, damit es dann zur Lunge transportiert werden kann [17, 52]. Sowohl CO als auch O₂ werden im Blut bevorzugt an Hämoglobin gebunden und transportiert. Dabei konkurrieren sie um die gleiche Bindungsstelle am Hämoglobin. Die oben beschriebene bevorzugte Bindung des COs an Hämoglobin resultiert aus der im Vergleich zum Sauerstoff, bis zu 240fach erhöhten Affinität des COs zu Hämoglobin [52, 71, 72].

Das Hämoglobinmolekül besteht aus vier Untereinheiten und ist somit ein tetrameres Protein. Die Untereinheiten setzen sich aus je einem Globin-, das heißt Proteinanteil, und einem Häm-Anteil zusammen. Bei den vier Globinuntereinheiten handelt es sich um zwei α -Ketten mit 141 Aminosäuren und zwei β -Ketten mit je 146 Aminosäuren (siehe Abbildung 6).

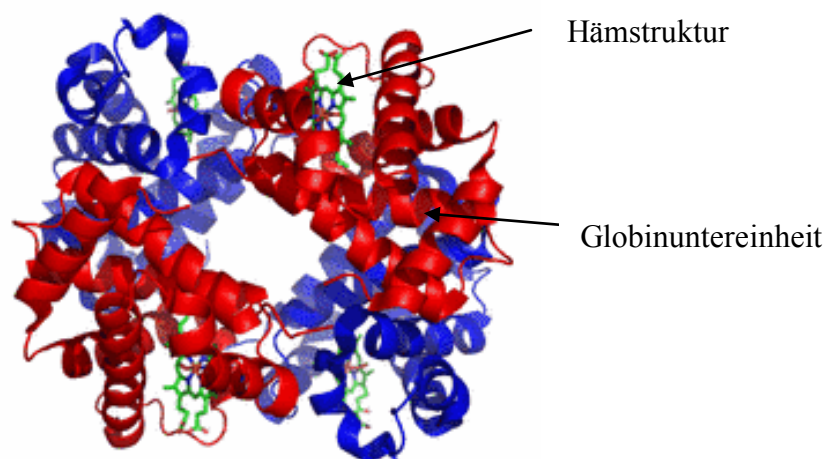


Abbildung 6: Hämoglobin (Quelle: Institut für Chemie TU Berlin)

Die Häm-Struktur besteht aus einem Porphyrinringsystem mit einem zentralen zweiwertigen Eisenatom, das ein Sauerstoffmolekül reversibel binden kann. Die hydrophobe Proteinumgebung schützt das Eisen vor der Oxidation zu dreiwertigem

Eisen, da nur zweiwertiges Eisen Sauerstoff binden und transportieren kann (**siehe Abbildung 7**) [10, 55].

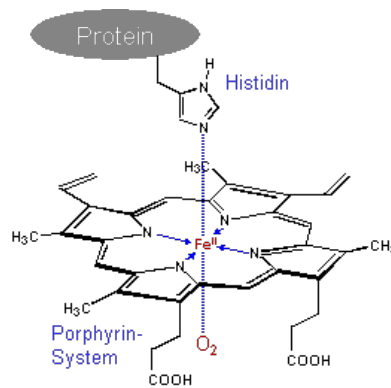


Abbildung 7: Porphyrinsystem (Quelle: Institut für Chemie Universität Erlangen)

Die Anlagerung des Sauerstoffs an das Eisenatom erfolgt ohne chemische Reaktion desselben und wird Oxygenation genannt. Die Abgabe des Sauerstoffs heißt Deoxygenation. Hämoglobin, das Sauerstoff gebunden hat, nennt sich somit Oxyhämoglobin und das sauerstofffreie Hämoglobin Deoxyhämoglobin. Ein Gramm Hämoglobin kann in vivo 1,34 ml Sauerstoff aufnehmen und transportieren. Dieser Wert wird Hüfner Zahl genannt. Die Affinität des Hämoglobins zum Sauerstoff verändert sich mit der Anzahl der gebundenen Sauerstoffatome. Wird ein Sauerstoffmolekül an eine Hämgruppe gebunden, so kommt es zu einer Konformationsänderung des Hämoglobins. Diese erleichtert die Aufnahme von weiterem Sauerstoff und erhöht die Affinität des gesamten Hämoglobinmoleküls für diesen Liganden. Umgekehrt verringert sich mit der Abgabe eines Sauerstoffmoleküls aus dem Oxyhämoglobin auch die Affinität zu den verbleibenden Molekülen. Daraus resultiert eine Abgabe von Sauerstoff an das Gewebe. Die Interaktion der Hämoglobinuntereinheiten wird positive Kooperation genannt. Die positive Kooperation findet man ausschließlich im tetrameren Hämoglobin. Das muskuläre Sauerstoffbindepotein Myoglobin liegt in monomerer Form vor und zeigt daher keine positive Kooperation.

Die positive Kooperation ist somit die Ursache für den sigmoiden Verlauf der Sauerstoffbindungskurve. Die Sauerstoffbindungskurve beschreibt die Änderung der Sauerstoffsättigung des Hämoglobins in Abhängigkeit vom Sauerstoffpartialdruck (**siehe Abbildung 8**).

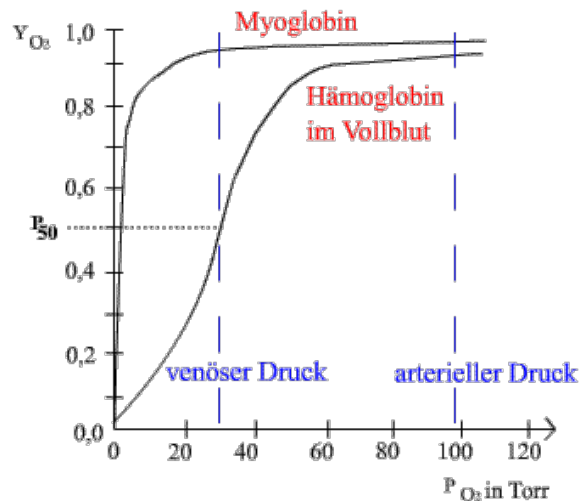


Abbildung 8: Sauerstoffsättigungskurve (Quelle: Chemgapedia)

Die Sauerstoffsättigung des Hämoglobins ist dabei auf der Ordinaten aufgetragen, der Sauerstoffpartialdruck in Torr auf der Abszisse. Die Sauerstoffbindungskurve des Myoglobins verläuft hyperbol. Die Sättigung des Myoglobins steigt mit zunehmendem Sauerstoffangebot und nähert sich rasch 100%. Aus Abbildung 8 wird ebenfalls ersichtlich, dass die Affinität des Myoglobins zu Sauerstoff im physiologischen Bereich über der des Hämoglobins liegt. Dies erleichtert die Sauerstoffabgabe von Hämoglobin an Myoglobin im muskulären Gewebe [10, 12, 53, 55, 56].

Der sigmoide Kurvenverlauf des Hämoglobins birgt mehrere Vorteile. Durch den raschen Sättigungszuwachs bei niedrigen Partialdrücken kommt es schnell zum Erreichen von Sättigungswerten über 90%. Im darauf anschließenden flacheren Teil der Kurve müssen relativ große Druckdifferenzen aufgebracht werden um die Sättigung weiterhin ansteigen zu lassen. Umgekehrt bedeutet dies aber, dass eine physiologisch notwendige Sättigung von 80-90% auch schon bei geringen Partialdrücken gewährleistet ist, und Schwankungen des Sauerstoffpartialdrucks zwischen 60 und 90 mmHg, wie sie im Alter, bei Diffusionsstörungen oder großen Höhen entstehen können, nur geringe Auswirkungen auf die Sättigung haben. Bei der Sauerstoffabgabe profitiert der Körper von den geringen Druckänderungen, die im steilen Teil der Kurve zu einer Sättigungsänderung von Nöten sind. Denn bei der Sauerstoffabgabe in der Endstrombahn der Gefäße sind große Teile des vorher geladenen Sauerstoffs bereits abgeschöpft und der verbleibende Sauerstoffpartialdruck des Blutes liegt nur noch geringfügig über dem des sauerstoffarmen Gewebes. Durch die Eigenschaft des Hämoglobins reicht hier schon eine geringe Differenz der Sauerstoffpartialdrücke für eine deutliche Entsättigung des Hämoglobins und zur Oxygenierung des Gewebes aus

[55]. Ein Maß für die Sauerstoffaffinität ist der Halbsättigungsdruck P_{50} , der normalerweise bei etwa 26mmHg liegt und dem Partialdruck entspricht, an dem 50% des vorhandenen Hämoglobins mit Sauerstoff beladen sind. Kommt es zu einer Affinitätszunahme des Hämoglobins, sinkt der benötigte P_{50} . Daraus resultiert eine Linksverschiebung der Sauerstoffbindungskurve auf der Abszisse. Verringert sich die Affinität, erhöht sich P_{50} und die Kurve verschiebt sich auf der Abszisse nach rechts (siehe Abbildung 9).

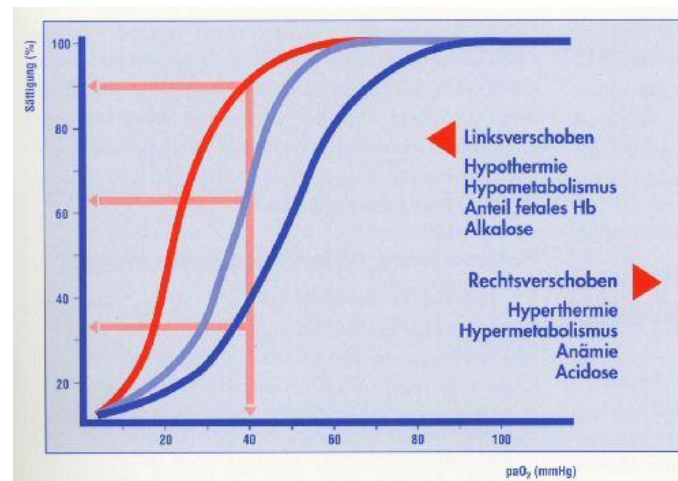


Abbildung 9: Verschiebung der Sauerstoffsättigungskurve (Quelle: Hochschule Esslingen)

In Vivo existieren vier physiologische Faktoren, die die Sauerstoffaffinität des Hämoglobins beeinflussen. Der wichtigste Modulator ist 2,3 Bisphosphoglycerat, das in einem Nebenweg der Glykolyse in den Erythrozyten entsteht. Es senkt die Affinität des Hämoglobins zum Sauerstoff. Auch eine Verringerung des pH-Werts führt zu einer Abnahme der Affinität. Weitere Faktoren, die eine Rechtsverschiebung der Sauerstoffbindungskurve bewirken, sind eine Temperaturerhöhung, sowie eine Zunahme der CO_2 Konzentration im Blut. Diese Voraussetzungen findet man im arbeitenden Muskel. Eine Affinitätsabnahme resultiert hier in einer verbesserten Sauerstoffversorgung des Muskels [55].

2.2.2.3 Dyshämoglobine

In den Erythrozyten entsteht in einer physiologischen Reaktion, in Form einer spontanen Autooxidation, aus Hämoglobin Methämoglobin. Im Methämoglobin liegt das Eisen in dreiwertiger Form als Fe^{3+} vor und ist somit für den Sauerstofftransport nicht geeignet. Etwa 1% des Hämoglobins im Körper wird täglich spontan in dieses Dyshämoglobin umgewandelt. Durch erythrozytäre Methämoglobinreduktasen und

nichtenzymatische Reaktionen mit Glutathion wird diese Reaktion jedoch kontinuierlich rückgängig gemacht. Damit ist das Hämoglobin wieder nutzbar [55]. Bei Methämoglobinkonzentrationen größer als 1% spricht man von einer Methämoglobinämie [93].

Ein weiteres Dyshämoglobin, das Carboxyhämoglobin (COHb), entsteht durch die Bindung von CO an das zweiwertige Eisen der Hämgruppe. In Anwesenheit von CO und O₂ wird die Bildung von Carboxyhämoglobin gegenüber Oxyhämoglobin deutlich bevorzugt. Dies liegt, wie oben bereits erwähnt, an einer 240-fach erhöhten Affinität der im Hämoglobin vorhandenen Häm-Gruppen zu CO im Vergleich zu O₂. Diese erhöhte Affinität resultiert aus der Geometrie der chemischen Bindung. Das im Häm gebundene zentrale Fe²⁺ hat sechs Koordinationsstellen über die es Bindungen zu anderen Atomen oder Molekülen aufnehmen kann. Vier dieser Koordinationsstellen sind durch Stickstoffatome des Porphyrinringsystems belegt. Eine Koordinationsstelle geht eine Verbindung mit einem Histidin-Molekül des umgebenden Proteinanteils des Hämoglobin ein. An die verbleibende Koordinationsstelle kann nun entweder CO oder O₂ gebunden werden [19]. Die Bindung von O₂ erfolgt in Form einer abgewinkelten Bindung (siehe Abbildung 10).

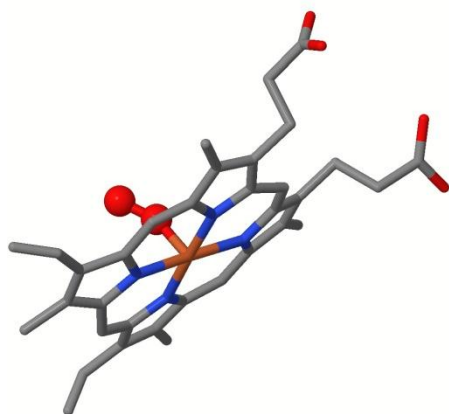


Abbildung 10: Häm-Gruppe mit gebundenem O₂ Molekül (Quelle: Chemgapedia)

CO hingegen wird in einer linearen Bindung an das Fe²⁺ gebunden. Diese lineare Bindung ist durch überlappende Orbitale und ausgeprägte Wechselwirkungen mit den umgebenden Molekülen deutlich stabiler als eine abgewinkelte Bindung (siehe Abbildung 11)

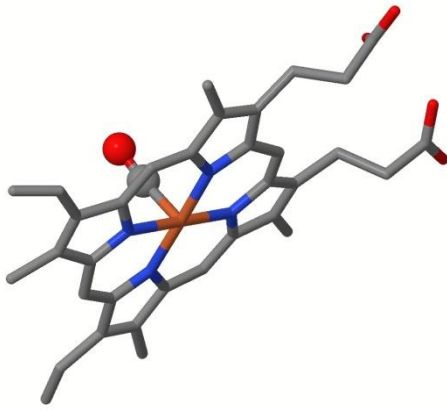


Abbildung 11: Häm-Gruppe mit gebundenem CO-Molekül (Quelle: Chemgapedia)

Freie, das heißt nicht an die Globinuntereinheiten gebundene, Hämgruppen weisen aufgrund dieser starken linearen Bindung eine bis zu 20.000fach erhöhte Affinität zu CO auf. Im Hämoglobinmolekül zwingt das an der 5. Koordinationsstelle gebundene Histidin das CO jedoch ebenfalls in eine leicht abgewinkelte Bindung, so dass sich die Affinität um das Zehnfache verringert. Damit ist sie immer noch 200fach höher, als die Affinität zu O₂. [19]

Die Bildung von COHb ist ein reversibler Prozess, der von der Höhe des COHb Ausgangswertes im Organismus, der CO-Umgebungskonzentration, der Expositionszeit, der körperlichen Aktivität, der Ventilationsrate und der individuellen Konstitution eines Individuums abhängt [21, 39].

In der Regel werden ca. 80-90% des eingeatmeten CO an Hämoglobin gebunden [71]. Bei einer Exposition gegenüber einer konstanten CO-Konzentration kommt es zunächst zu einem rapiden Anstieg des COHb-Wertes. Nach etwa sechs bis acht Stunden stellt sich dann ein stationäres Gleichgewicht ein. In welcher Höhe sich die Gleichgewichtskonzentration einstellt, hängt von der Menge inhalierten COs, der Gesamtmenge an Hämoglobin, der Ventilation und von der Menge des zirkulierenden Blutvolumens ab [71]. Eine Ablösung des gebundenen COs lässt sich nur durch eine Beendigung der CO Zufuhr, bei gleichzeitiger Zunahme der O₂ Zufuhr erreichen. Auch die Komplexbildung von HbO₂ stellt eine Gleichgewichtsreaktion dar, bei der freie und gebundene Moleküle in einem bestimmten Verhältnis zueinander vorliegen. Erhöht man das Angebot an freiem O₂ in ausreichendem Maße, überwiegt das Bestreben dieses freien O₂ an Hämoglobin zu binden. Damit wird CO gleichzeitig aus seiner Bindung an Hämoglobin verdrängt.

Da außer dem Hämoglobin auch muskuläres Myoglobin durch CO besetzt wird, kommt es neben der Bildung von COHb auch zur Entstehung von Carboxymyoglobin (COMb). Der Anstieg der COMb-Konzentration in Prozent beträgt ca. ein Drittel des Anstiegs des COHb-Wertes in Prozent [16]. Auch die Hämgruppen in hämtragenden Enzymen können von CO besetzt werden.

Mathematisch wird der Zusammenhang zwischen den Gaspartialdrücken und COHb-Entstehung durch die Haldane Gleichung beschrieben:

$$\frac{[HbCO]}{[HbO_2]} = M \cdot \frac{(pCO)}{(pO_2)}$$

(M= Haldane Koeffizient = näherungsweise 200) [71]

Daraus wird ersichtlich, dass eine Zunahme des CO-Partialdrucks (pCO), ebenso wie eine Abnahme des O_2 -Partialdrucks (pO_2) zu einer Zunahme der COHb- Konzentration $[HbCO]$ führen kann. Das bedeutet, dass auch geringfügige CO-Konzentrationen bei einem niedrigen Sauerstoffgehalt der Umgebungsluft zu gefährlichen COHb-Werten und zu einer Steigerung der CO-Bindung an intrazelluläre Hämproteine führen können [16, 17, 71]. Die biologische Halbwertszeit variiert interindividuell stark, hängt vom Ausgangswert und der Ventilationsrate ab und beträgt ca. 1-2 Stunden [39]. Durch eine hyperbare Oxygenierungstherapie (100% Sauerstoff, 3atm) verkürzt sie sich auf etwa 30 Minuten [52, 53].

Ein Anteil von bis zu 0,5% COHb entsteht physiologisch durch den endogenen Hämatabolismus. Die Differenz zu den tatsächlichen COHb-Normalwerten entsteht vorwiegend durch Rauchen und Passivrauchen. Verschiedene Studien geben für Nichtraucher Werte zwischen 0,4% - 1,6% und < 3% beziehungsweise Werte zwischen 3% - 6% und < 10% für Raucher als Normwerte an [28, 59, 93].

2.2.2.4 Toxische Wirkung des COHb

Die vollständige toxische Wirkung des CO im menschlichen Körper und die ihr zugrundeliegenden pathologischen Mechanismen sind bis dato nicht zur Gänze erforscht und verstanden [45]. Vorausgehende Studien untersuchten und zeigten mögliche unterschiedliche Intoxikationsmechanismen [6, 15, 17, 39, 45, 53, 54, 93]. Als Hauptursache für die auftretenden Symptome einer CO-Intoxikation wird dabei die entstehende Hypoxie betrachtet [39]. Ergänzend können intrazelluläre pathologische Mechanismen die Wirkung der Hypoxie verstärken. Intrazelluläre Reaktionen auf die

Inhalation von CO scheinen die Hauptursache für Spätfolgen einer CO-Intoxikation zu sein [39].

Die hypoxische Wirkung von CO resultiert zum einen aus der Verminderung der Sauerstofftransportkapazität und zum anderen aus einer Reduktion der Sauerstoffabgabe an das Gewebe. Die verminderte Transportfähigkeit resultiert aus der bevorzugten Bindung von CO an Hämoglobin in der Lunge. Da 98,5% des Blutsauerstoffs an Hämoglobin gebunden werden und nur auf diesem Wege die zu versorgenden Gewebe erreichen kann, verringern Änderungen der oxygenierten Hämoglobinkonzentration durch CO das Sauerstoffangebot im gesamten Organismus. Gleichzeitig wird auch die Sauerstoffdiffusion in Lunge und Muskel blockiert, da CO langsamer als Sauerstoff vom Hämoglobin abdissoziiert. Die Ursache der reduzierten Sauerstoffabgabe im Gewebe ist eine Interaktion zwischen COHb und HbO₂. In Anwesenheit von COHb erhöht sich die Affinität des verbleibenden Sauerstoffes zu dem jeweils gebundenen Hämoglobin. Die Sauerstoffbindungskurve verschiebt sich nach links. Dies führt dazu, dass der gebundene Sauerstoff im Gewebe nur schwer abgegeben wird. Die resultierende Unterversorgung wird durch eine alleinige Messung des HbO₂ nicht erkannt und ist stärker als eine äquivalente Verminderung des Gesamthämoglobins [72, 93]. Eine Sauerstoffunterversorgung des Gewebes führt zu erheblichen Einbußen in der Energiegewinnung der Zellen, da die zelluläre Energie zum größten Teil in der mitochondrialen oxidativen Phosphorylierung umgesetzt wird und diese Sauerstoff als Substrat benötigt [17, 56]. Ein Sauerstoffmangel führt somit zu einer anaeroben Stoffwechsellage, die einen Laktatanstieg im Gewebe zur Folge hat [45]. Die resultierende metabolische Azidose verursacht ein intrazelluläres Ödem, was den Zelltod zur Folge haben kann. Sowohl die Hypoxie der Zellen, als auch die Azidose fördern die Bildung von freien Radikalen und münden ebenfalls in der Zellnekrose [65]. Diese aus der CO-Inhalation resultierende Hypoxie betrifft zuerst Organe mit einem hohen Sauerstoff- und Energiebedarf. Aus diesem Grund macht sich eine CO-Intoxikation als erstes in ZNS und Myokard bemerkbar. In den Muskelzellen von Myokard und Skelettmuskel wird dieser Effekt zusätzlich dadurch verstärkt, dass CO auch an intrazelluläres Myoglobin bindet.

Verschiedene mögliche Intoxikationsmechanismen wurden auf biochemischer und molekularbiologischer Ebene untersucht. Sie sind aber in ihrer Bedeutung für das klinische Bild einer CO-Intoxikation nicht abschließend erfasst [39]. Inhalativ aufgenommenes CO kann außer zur Häm-Einheit des Hämoglobins Bindungen zu allen

Hämgruppen des Körpers eingehen. Daraus ergibt sich einer der intrazellulären Angriffspunkte: Die Zytochromoxygenasen. Zytochromoxygenasen sind ein wichtiger Bestandteil der mitochondrialen oxidativen Phosphorylierung und werden durch CO-Bindung im reduzierten Zustand blockiert. Dies führt dazu, dass die intrazelluläre Atmungskette nicht nur durch den Substratmangel, sondern zusätzlich auch durch dysfunktionale Enzyme gehemmt wird [44]. Des Weiteren setzen reduzierte Zytochromoxygenasen zytotoxische Sauerstoffradikale frei, die die Zelle schädigen [72]. Diese zytotoxischen Radikale entstehen ebenfalls bei der CO-induzierten Konversion der Xanthindehydrogenase in Xanthinoxidase [72]. Weitere intrazelluläre Angriffspunkte sind die Enzyme Guanylatcyclase und Nitrit-Oxid –Synthase. Diese werden durch CO reduziert und ihre Funktion dadurch beeinträchtigt [44]. Zusätzlich wird vermutet, dass CO die thrombotische Aktivität der Thrombozyten und Erythrozyten erhöht und somit zu einer vermehrten intravasalen Thrombusbildung führen kann [61]. Da CO auch als Neurotransmitter im ZNS fungiert, besagt eine weitere Theorie der toxischen Wirkung, dass neuronale und gliale Synapsen, die physiologischerweise durch endogenes CO gesteuert werden, mit Zunahme des inhalierten COs eine Dysregulation erfahren. Auch eine Beeinflussung der dopaminergen und serotonergen Transmitterfunktion wird diskutiert [39].

Weitere Studien haben gezeigt, dass CO im ZNS polymorphnukleare Leukozyten (PMNL) aktiviert, was eine Diapedese von Leukozyten und damit eine Schädigung der Blut-Hirn-Schranke zur Folge hat. Des Weiteren führt dies zu einer Peroxydation von Fetten, die den Abbau von ungesättigten Fettsäuren verursacht. Dies kann wiederum eine irreversible Demyelinisierung im ZNS mit Infarkten der weißen Substanz zur Folge haben [39, 45, 72]. In Anwesenheit von viel gelöstem CO können diese Effekte verzögert werden. CO beeinflusst die Interaktion von Thrombozyten und Stickoxiden. Daraus resultiert das PMNLs initial aktiviert werden, zunächst aber an Endothelzellen anhaften. Erst wenn die CO-Konzentration sinkt, kommt es zur Diapedese [39]. Hierin wird eine der Hauptursachen für verzögert auftretende neurologische Symptome nach CO-Intoxikation gesehen. Eine weitere Ursache für eine über die Dauer der Exposition hinaus gehende CO Wirkung ist die Bildung reaktiver Sauerstoffspezies (ROS). So kann es nach einer CO-induzierten Gewebhypoxie zu einer übersteigerten Reoxygenierung kommen. Diese führt zur Bildung von ROS in den Mitochondrien der betroffenen Zellen, die essentielle Proteine oxidieren und somit schädigen können [44, 109].

Da CO weder durch Geschmack noch Geruch auf sich aufmerksam macht, seine Vergiftungserscheinungen unspezifisch sind und die anderer Noxen imitiert, bleiben viele CO-Intoxikationen unentdeckt. Der Internationale Kongress für Toxikologie bezeichnete CO 1988 sogar als „the unnoticed poison of the 21st century“ [45, 53, 54, 72]. Betrachtet man CO-Intoxikationen, so muss die akute von der chronischen CO-Intoxikation unterschieden werden. Diese Unterscheidung wird anhand der unterschiedlichen Expositionsdauer gegenüber dem CO getroffen. Bei einer akuten CO-Vergiftung handelt es sich um eine Vergiftung, die durch eine einmalige, nicht länger als 24 Stunden anhaltende CO-Exposition verursacht wurde. Eine chronische Vergiftung entsteht durch die über Tage und Wochen andauernde, auch intermittierende, Exposition gegenüber geringeren Mengen COs [68]. Die Symptome können sich trotz der vollkommen unterschiedlichen Expositionsdauer ähneln. Individuelle Faktoren, die das klinische Bild einer CO-Vergiftung beeinflussen, sind kardiovaskuläre, pulmonale, metabolische oder zentralnervöse Vorerkrankungen, sowie Alter und Geschlecht des Patienten [45]. Alle Symptome lassen sich jedoch auf eine generalisierte Gewebhypoxie und die oben erwähnten intrazellulären Mechanismen zurückführen [57, 93].

Erste Vergiftungserscheinungen einer akuten CO-Intoxikation können sich bei einem COHb ab 10% in Form von Kopfschmerzen und Sehstörungen bemerkbar machen [71, 72]. Darüber kommt es zu Übelkeit, Schwindel, Schwäche, Thoraxschmerz, Erbrechen und Benommenheit. Die Benommenheit resultiert zum Teil aus einer hypoxisch bedingten Schwellung des Gehirns. Etwa bei Werten ab 40% kommt es laut WHO zu Kollaps- und Komazuständen, außerdem zu Krämpfen, Tachykardie, Tachypnoe und Schock. Bei COHb Werten von über 60% besteht akute Lebensgefahr [52, 54, 71, 72, 93, 103]. In vielen Lehrbüchern wird das Hautkolorit CO-intoxizierter Patienten als „kirschrot“ bezeichnet, da es aufgrund der roten Farbe des COHbs, trotz Sauerstoffmangels, nicht zu einer Zyanose kommt. Dies wird in der Realität selten beobachtet [72, 93]. Die Symptome einer chronischen CO-Intoxikation können Kopfschmerzen, Übelkeit und Müdigkeit sein. Des Weiteren kommt es zu Beeinträchtigungen der Kognition.

Da beide Formen der Intoxikation mit einer Gewebhypoxie einhergehen, sind besonders das Herz und das Gehirn mit ihren hohen sauerstoffabhängigen Stoffwechselraten gefährdet [45, 54]. Die Gefährdung des Herzens resultiert einerseits aus einer Unterversorgung des stark sauerstoffabhängigen Myokards, der das Herz mit

einer Koronardilatation und der Steigerung der Herzfrequenz entgegenzuwirken versucht. Andererseits entsteht sie durch die Bindung des COs an myokardiales Myoglobin. Dabei kommt es zu ultramikroskopischen Läsionen der Muskelfasern. Beides führt zum Untergang des minderversorgten Gewebes in Form von subendokardialen oder endokardialen Nekrosen [61, 72]. Daher kommt es im Rahmen von CO-Vergiftungen schnell zu einem Anstieg der Herzmarker Troponin I, GOT, CK und LDH, pectanginösen Thoraxschmerzen und Arrhythmien [45, 61]. Auch akute Myokardinfarkte bei jungen herzgesunden Menschen ohne kardiovaskuläre Risikofaktoren werden beschrieben [61]. Die akute Morbidität einer CO-Intoxikation beruht hauptsächlich auf neu aufgetretenen Herzrhythmusstörungen [5]. Kardiovaskulär vorbelastete Menschen reagieren sehr viel empfindlicher. Sie zeigen schon bei COHb-Werten von 2,5% bis 4% eine verminderte Leistungsfähigkeit durch auftretende Thoraxschmerzen. Bereits geringe CO-Belastungen können, im Vergleich zu herzgesunden Patienten, zum Tode führen. Studien zeigen, dass ein Herzstillstand, ausgelöst durch eine CO-Intoxikation, trotz Therapie der Intoxikation nur in den seltensten Fällen überlebt wird [43, 64]. Jede COHb-Belastung wird als potentiell kardiotoxisch angesehen [11, 92].

Im zentralen Nervensystem (ZNS) kommt es im Falle einer akuten CO-Vergiftung zu petechialen Blutungen im Corpus callosum und zu Nekrosen im Pallidum, im Hippocampus und der Substantia nigra. Außerdem werden eine hypoxische Hirnschwellung, Ablagerungen von Leukozyten am Neuronenendothel sowie ein Verlust von Purkinje-Zellen im Kleinhirn beschrieben [39, 72]. Langfristige neurologische Folgen können zwischen drei Tagen und acht Monaten nach einer Intoxikation auftreten und persistieren. Bei bis zu 11% der Patienten konnte ein biphasischer Verlauf, mit einer initialen Besserung und anschließend erneuter Verschlechterung nachgewiesen werden (delayed encephalopathy). Die auftretenden neurologischen Symptome sind sehr vielfältig und variieren in ihrer Intensität. Es kann zu Persönlichkeitsveränderungen, Parästhesien, milden Demenzen, Psychosen, Parkinson-Syndromen, Kleptomanie, Apraxien, Ataxien, kortikaler Blindheit, Depressionen, sowie Multiple Sklerose ähnlichen Krankheitsbildern kommen [6, 40, 57, 72]. Ein Drittel aller schweren CO-Intoxikationen geht mit neurologischen Spätfolgen einher [66].

Alle Zusammenhänge zwischen Symptomen und der Höhe der gemessenen COHb-Werte müssen als Orientierung betrachtet werden, da der klinische Schweregrad nur

grob mit diesen Werten korreliert. Er scheint vielmehr von der Dauer der CO-Einwirkung, der Konzentration, der Elimination und den oben genannten individuellen Faktoren abzuhängen [46, 52, 57, 93]. Besonders wenig Aussagekraft scheint der COHb-Wert hinsichtlich der neurologischen Symptomatik liefern zu können. Während Kopfschmerzen und Übelkeit mit zunehmenden COHb-Konzentrationen ansteigen, kann ein schlechter neurologischer Status sowohl bei hohen, als auch bei niedrigen COHb-Werten erhoben werden [39]. Trotz abnehmender Carboxyhämoglobinkonzentrationen können diese Vergiftungssymptome bestehen bleiben, oder sogar zunehmen [46, 57]. Etwa 15 - 40 % der Überlebenden einer CO-Vergiftung zeigen neurologische oder kardiale Spätfolgen, die zwei bis 40 Tage nach Expositionsende noch auftreten können [93]. Mehr als 40% aller Patienten mit einer chronischen CO-Exposition zeigen auch noch drei Jahre nach der Beendigung der Exposition eine neurologische Symptomatik, deren Schweregrad variieren kann [93]. Die Spätfolgen treten nicht nur nach schweren Vergiftungen, sondern auch nach leichten Intoxikationen mit COHb Werten ab 10% auf. Die Mortalität aller CO-Intoxikationen wird mit 30 - 40% angenommen [5, 97].

2.2.2.5 CO-Intoxikation als Teil der Rauchgasvergiftung

Eine CO-Intoxikation stellt im Kontakt mit Brandrauch zunächst die größte Gefahr dar. Sie ist die häufigste unmittelbare Todesursache nach einer Rauchgasvergiftung und ist außerdem die häufigste Todesursache bei Wohnungsbränden [108]. Weitere Inhaltsstoffe wie Zyanide, Benzole, Formaldehyde und Pestizide stellen, teilweise in Kombination mit CO, eine zusätzliche Bedrohung dar. Rauchgasinhalation führt zur Entstehung von akuten respiratorischen und kardiovaskulären Erkrankungen. Bei einem Inhalationstrauma kommt es einerseits zu einem, durch die Rauchgase verursachten, Absterben der zilientragenden Zellen, zur Vernichtung von Surfactant, Pneumozyten Typ 2 und zu mikrovaskulären Schädigungen der Lungenkapillaren [9]. Andererseits werden durch die Stimulation von neutrophilen Granulozyten Gewebsproteasen aktiviert. Damit kommt es zu einer Ausschüttung von Neuropeptiden, die das pulmonale Gewebe schädigen. Daraus resultieren ein Ödem der oberen Atemwege [42, 96], eine Entzündung des Larynx, sowie eine gesteigerte Bakterienproliferation mit Entzündungen und Atelektasen der kleineren Bronchien. Ödeme und Atelektasen verstärken die durch die Brandgaswirkung entstandene Hypoxie [3, 5, 46, 97].

Verbrennungen und Verrußungen im Gesicht können ein äußerlicher Hinweis dafür sein, dass ein Inhalationstrauma vorliegt.

Auf zellulärer Ebene kommt ein synergistischer Effekt von CO und Zyanid hinzu. So binden Zyanide wie CO an die Zytochromoxidase, den Komplex IV der zelleigenen Atmungskette. Sie blockieren die Zellatmung und reduzieren die Sauerstoffausbeute der Zelle. Treten beide Gase gemeinsam auf, können auch kleine, ansonsten unbedenkliche, Konzentrationen toxisch sein [15, 50, 74]. Ein weiterer synergistischer Effekt entsteht zwischen CO und CO₂. Im Brandrauch erhaltenes CO₂ steigert den Atemantrieb und somit die weitere Aufnahme von CO [71].

In der forensischen Medizin gilt der Nachweis von COHb im Blut einer Brandleiche als Zeichen vitaler Brandexposition. Bei Werten zwischen 10-50% wird ein Inhalationstrauma angenommen. Werte ab 30-40% machen eine Selbstrettung aus dem Brandraum unmöglich. Bei Werten größer 50% gilt die Rauchvergiftung als primäre Todesursache [11, 71, 93].

2.2.2.6 Therapie

Zur Therapie der akuten CO-Vergiftungen muss der Patient zunächst dem Einfluss der Noxe entzogen werden. Die eigentliche Therapie besteht dann in der Gabe von 100% Sauerstoff über eine dichtsitzende Maske, bei bewusstlosen, nicht atmenden Patienten auch über einen endotracheal eingelegten Tubus [29]. Schwere CO-Vergiftungen werden in spezialisierten Einrichtungen mittels hyperbarer Sauerstofftherapie behandelt. Die hyperbare Sauerstofftherapie verringert die Eliminationshalbwertszeit auf ca. 30 min. Sie führt durch eine massive Erhöhung der plasmatischen Sauerstoffkonzentration zu einer hämoglobinunabhängigen Versorgung der Gewebe [18, 50, 52, 57, 101, 102].

2.2.3 Messung von COHb mittels Pulsoxymetrie

Die Bestimmung des COHb-Spiegels eines Patienten erfolgte bis zur Entwicklung der Co-Pulsoxymetrie ausschließlich im Labor. Hierzu gibt es zwei etablierte Messverfahren. Eine Bestimmung ist einerseits mittels Gaschromatographie, andererseits mittels Photospektrometrie möglich.

Für die Untersuchung mittels Gaschromatographie muss das CO zunächst aus einer entnommenen Blutprobe gelöst werden. Dazu wird die Blutprobe mit CO-lösenden und hämolytischen Agenzien versetzt. In der Regel handelt es sich hierbei um eine Saponin-

Schwefelsäurelösung [99, 104]. Diese Lösung wird über den Injektor in den Gaschromatographen (siehe Abbildung 12) injiziert.

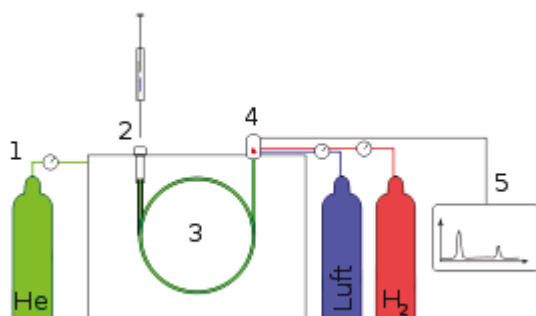


Abbildung 12: Prinzipieller Aufbau eines Gaschromatographen (1:Trärgas, 2:Injektor, 3: Säule im GC-Ofen, 4: Detektor, 5. Signalaufzeichnung) [105]

Mit Helium als inertem Trägergas wird sie durch die Säule im GC-Ofen transportiert [105]. Je nach Polarität und Dampfdruck verweilen Gasmoleküle unterschiedliche lange in der stationären Phase der Säule [105]. Angeschlossen an die Säule ist ein Wärmeleitdetektor. Dieser detektiert beim Durchströmen eines Gases eine Änderung der Wärmeleitfähigkeit, was wiederum eine Änderung des elektrischen Widerstandes zur Folge hat [104]. Diese Änderung erzeugt ein Signal, das ein am Detektor angebrachter Schreiber graphisch darstellt [104, 105]. Dieser graphisch dargestellte Peak gibt nun Aufschluss über die Menge der vorhandenen Substanz und, über einen Vergleich mit Aufzeichnungen von Standardsubstanzen, auch über die Art der untersuchten Substanz. Die Ermittlung des prozentualen COHb Gehaltes erfolgt über einen Vergleich mit der Messung einer zuvor mit 100%CO aufgesättigten Probe. Zur Berechnung wird untenstehende Formel nach Dam&Daenens verwendet [99].

$$\text{COHb in \%} = \frac{\text{Peakfläche der untersuchten Probe} \times 100}{\text{Peakfläche der carboxylierten Probe}}$$

Peakfläche der carboxylierten Probe

Die Bestimmung von COHb mittels der Photospektrometrie macht sich die unterschiedlichen Absorptionsspektren von COHb, O₂Hb, MetHb und desoxygeniertem Hb zu Nutze. Die Blutfärbung entsteht durch die Lichtabsorption der Hämgruppe. Dafür sind die zahlreichen konjugierten Doppelbindungen im Porphyrinringsystem verantwortlich. Die Resonanz und damit auch die Lichtabsorption verändern sich mit dem jeweiligen Liganden am Hämeisen. Oxyhämoglobin hat zwei Absorptionsmaxima bei ca. 541 und 578 nm. Dies entspricht grünem und gelbem Licht. Diese Wellenlängen werden absorbiert, so dass nur noch das Licht der Komplementärfarbe sichtbar wird. Es

erscheint hellrot. Carboxyhämoglobin hat ebenfalls zwei Absorptionsmaxima bei ca. 538 und 570nm. Deoxyhämoglobin hat sein Absorptionsmaximum bei ca. 550 nm. Es absorbiert grün-gelbes Licht und erscheint dunkelrot mit einem starken Blauanteil [55, 72, 88, 104] (siehe Abbildung 13).

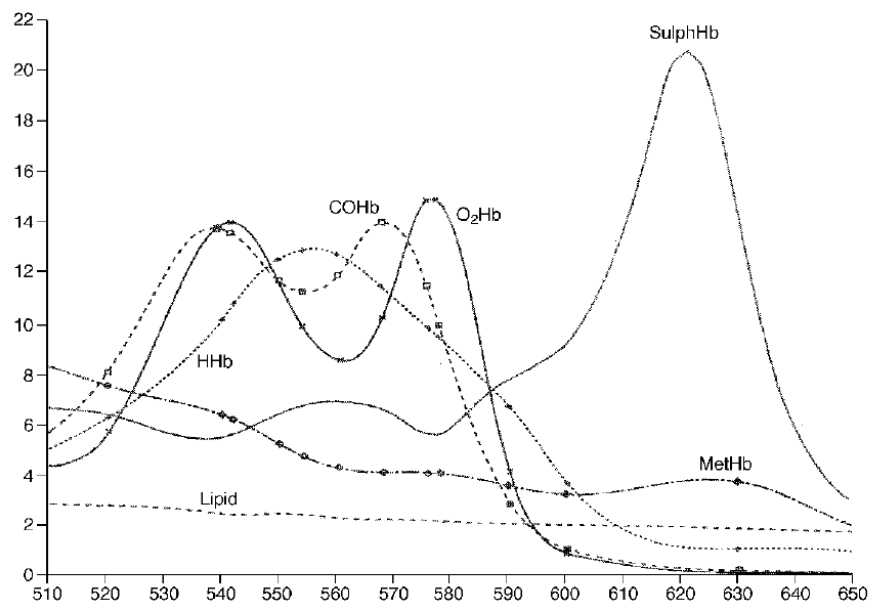


Abbildung 13: Absorptionsspektren [104]

Zur Durchführung der Photospektrometrie wird eine gewonnene Blutprobe in einem CO-Oximeter hämolysiert und in eine Küvette zur Absorptionsmessung gegeben. Mit monochromatischem Licht unterschiedlicher bekannter Wellenlängen wird nun die jeweilige Absorption gemessen. Über das Lambert-Beersche Gesetz:

$$A = \varepsilon \times d \times C$$

(A= Absorption, ε = molarer Absorptionskoeffizient, d=Wellenlänge, C=Stoffkonzentration)

berechnet das CO-Oximeter bei bekanntem Absorptionskoeffizienten und bekannter Wellenlänge die jeweilige Hämoglobinkonzentration. Da die Absorptionsspektren teilweise eng beieinander liegen, werden hochpräzise Wellenlängenfilter verwendet, um unter Verwendung exakt monochromatischer Wellenlängen die Absorption zu messen. Es werden Wellenlängen verwendet, die den jeweiligen Absorptionsmaxima der verschiedenen Hämoglobine entsprechen. Um die miterfasste Hintergrundabsorption zu detektieren werden ergänzende Messungen bei anderen Wellenlängen hinzugefügt [104]. Zur Bestimmung von COHb verwenden einige CO-Oximeter zusätzliche Wellenlängen im Infrarotbereich. Hier zeigt COHb spezifische Absorptionsbanden bei

1953nm und 1969nm. Somit werden Interferenzen zwischen O₂Hb und COHb, die bei höherfrequenten Wellenlängen möglicherweise entstehen können, messtechnisch eliminiert [104].

Den aktuellen Goldstandard für den klinischen Nachweis von COHb stellt die Photospektrometrie dar [99, 104]. Im Vergleich zur Gaschromatographie erfordert sie eine weniger aufwendige Probenvorbereitung, ist leichter zu bedienen und liefert schneller die benötigten Ergebnisse. Dabei sind die Präzision und auch die Sensitivität der Messungen gleichwertig den Ergebnissen der Gaschromatographie [99, 104]. Einzig in der forensischen Medizin wird zur Untersuchung postmortal bereits degenerierter Blutproben die Gaschromatographie eingesetzt [104].

Für beide der oben beschriebenen Messverfahren gilt, dass eine exakte Bestimmung der jeweiligen Hämoglobinkonzentrationen nur dann möglich ist, wenn das gewonnene Blut entweder innerhalb von 60min untersucht wird, oder unter anaeroben Bedingungen tiefgefroren aufbewahrt wird [104]. Dieser Umstand führt dazu, dass es für eine präklinische Einschätzung der CO Belastung eher ungeeignet ist.

Die Bestimmung der Sauerstoffsättigung erfolgt präklinisch schon seit vielen Jahren nicht-invasiv mit Hilfe eines Pulsoxymeters. Auch dieses Gerät macht sich die unterschiedlichen Färbungen und Absorptionsspektren des Hämoglobins zunutze. Das herkömmliche Pulsoxymeter verfügt über einen Sensor der, ähnlich einer Wäscheklammer, an den Finger oder ein Ohrläppchen geklipst werden kann. Der Sensor emittiert auf einer Seite Licht von zwei spezifischen Wellenlängen für Oxyhämoglobin und Deoxyhämoglobin. Auf der anderen Seite des Sensors befindet sich ein Photosensor der detektiert, wie viel Licht der jeweiligen Wellenlänge durch den Finger oder das Ohrläppchen absorbiert wird, und errechnet daraus die Konzentration des jeweiligen Hämoglobins. Die Sauerstoffsättigung errechnet sich daraus wie folgt:

$$SO_2 \% = 100 \cdot \frac{HbO_2}{(Hb + HbO_2)}$$

(HbO₂= Konzentration des Oxyhämoglobins, Hb= Konzentration des Deoxyhämoglobins)

Zusätzlich zu der Sauerstoffsättigung misst das Pulsoxymeter die Pulsfrequenz in den Fingerkapillaren. Da Fingergrößen, aber auch die Fingerdicke eines Patienten unterschiedlich ausfallen und auch beim gleichen Probanden mit jedem Herzschlag variieren, ist bei der Berechnung der Hb-Konzentrationen ein Korrekturfaktor eingerechnet. Dieser Korrekturfaktor wurde zuvor durch vergleichende Messungen

gesunder Probanden ermittelt und gilt für jede pulsoxymetrische Messung [84]. Da COHb ähnliche Wellenlängen wie das oxygenierte Hämoglobins absorbiert, kann ein herkömmliches Pulsoxymeter mit nur zwei Wellenlängen dieses Dyshämoglobin nicht von oxygeniertem Hämoglobin unterscheiden. Daraus resultiert in Fällen einer CO-Intoxikation eine falsch hohe Sauerstoffsättigungsrate. Um diesen Fehler zu vermeiden und mögliche Carboxy- oder Methämoglobinämien auch non-invasiv messen zu können, brachte die Firma Masimo im Jahr 2008 ein Pulsoxymeter heraus, dass sowohl COHb, als auch MetHb gesondert erfasst (siehe Abbildung 14).



Abbildung 14: Rad 57 (Quelle: Masimo)

Dieses Pulsoxymeter emittiert Licht mit bis zu 12 verschiedenen Wellenlängen, unter anderem auch bei Wellenlängen, die den Absorptionsmaxima von Carboxyhämoglobin entsprechen. Ergänzend kommen Messungen im Infrarotbereich hinzu. Eine exakte Aufschlüsselung der verwendeten Wellenlängen wurde von diesem Hersteller nicht veröffentlicht [84, 104]. Des Weiteren wurden diese Geräte um einen arteriellen Pulsationsfilter und gegen Licht- und Radiowellen abgeschirmte Sensoren ergänzt [84]. Auch eine Methämoglobinämie wird von diesem Gerät erkannt und ebenso wie die Herzfrequenz, die Sauerstoffsättigung und das Carboxyhämoglobin kontinuierlich gemessen [8, 60, 62, 93]. Das Gerät ist von der US-amerikanischen Food and Drug Administration für den klinischen Gebrauch zugelassen [8, 20, 63, 84, 100]. Die Werte dieser pulsoxymetrischen Messung korrelieren laut Herstellerangaben mit einer Abweichung von $\pm 3\%$ für COHb und $\pm 0,45\%$ für MetHb mit den Messwerten photospektrometrischer Messungen. Diese und teilweise auch geringere Abweichungen konnten von vielen nachfolgenden vergleichenden Studien bestätigt werden. Diese Studien haben mit unterschiedlichen Fragestellungen, sowohl an gesunden, als auch an erkrankten Probanden, die Vergleichbarkeit der pulsoxymetrisch SpCO-Werte und photospektrometrischer COHb Messungen bestimmt [8, 20, 75, 94, 100, 107]. Die angegebene Abweichung von $\pm 3\%$ entspricht der Abweichung, die als internationaler Standard für herkömmliche Pulsoxymeter in der klinischen Anwendung bei der

Berechnung der Sauerstoffsättigung im Bereich 70-100% angesehen wird [8, 75]. Ein internationaler Standard für die maximal zulässige Abweichung von COHb-Werten existiert aktuell nicht [75]. In der vorliegenden Studie erfolgt die Erhebung der teilnehmenden Probanden im Brandsimulationscontainer oder nach unterschiedlichen Brandeinsätzen in den Städten Northeim und Marburg. Keiner dieser Einsatzorte liegt in räumlicher Nähe zu einem medizinisch-technischen Labor. Da eine photospektrometrische Messung bestimmte, oben erläuterte Transportbedingungen und zeitliche Begrenzung zwischen Entnahme und Analyse erfordert, wird im vorliegenden Fall eine photospektrometrische Bestimmung der COHb-Werte als nicht realisierbar erachtet. Die vom Hersteller angegebene Genauigkeit des RAD 57 wurde durch mehrere voneinander unabhängige Studien bestätigt. Da das Gerät außerdem eine Abweichung ähnlich der allseits präklinisch verwandten herkömmlichen Pulsoxymeter aufweist, wird dieses Gerät in der vorliegenden Studie verwendet. Bei ausreichend großer Probandenzahl ist außerdem davon auszugehen, dass sich die Messungenauigkeit beim Vergleich der Teilnehmergruppen aufhebt.

3 Erarbeitung der Forschungsfragen

Wie in den vorausgehenden Kapiteln bereits erläutert, registrieren die Feuerwehrunfallkassen deutschlandweit jedes Jahr mehrere hundert Fälle, in denen Feuerwehrangehörige durch Atemgifte im Einsatz zu Schaden kommen. In einigen Fällen endeten diese Zwischenfälle sogar tödlich. Keiner der genannten Unfallversicherer konnte jedoch eine verlässliche Aussage über die tatsächliche Gefährdungslage deutscher Feuerwehrleute im Atemschutzeinsatz treffen. Vorausgehende Untersuchungen haben ergeben, dass der COHb-Wert eines nichtrauchenden Feuerwehrmannes 1-2% über dem anderer Nichtraucher liegt [93]. Eine weitere ergab, dass eine verminderte pulmonale Leistungsfähigkeit von Feuerwehrleuten (im Vergleich mit anderen Berufsgruppen) aus der Belastung durch den Brandrauch resultiert und das Herzinfarktrisiko gesteigert sein kann [7, 71]. Die Schutzkleidung und die Sicherheitsgrundsätze, die der Atemschutzgeräteträger während seiner Ausbildung lernt, sollen die Gefährdung durch Feuer und Brandgase so weit wie möglich reduzieren. Eine CO-Intoxikation ist durch ihre unspezifischen, grippeähnlichen Symptome schwer zu erkennen. Sie kann in einigen Fällen sogar gänzlich ohne Symptome bleiben. Sollte es nach einem Atemschutzeinsatz dennoch zu Kopfschmerzen oder Schwindel kommen, so wird dies häufig den extremen Einsatzbedingungen zugeschrieben. Es ist davon auszugehen, dass viele CO-Vergiftungen unentdeckt und somit unbehandelt bleiben. Bereits eine intermittierende Exposition mit kleineren Mengen CO kann in eine chronische CO-Intoxikation münden. Da diese sowohl zu neurologischen, als auch zu kardiopulmonalen Spätschäden führen kann, ist es von großer Wichtigkeit, Feuerwehrangehörige vor dieser Belastung zu schützen. Die vorliegende Studie soll deshalb feststellen, inwieweit Feuerwehrangehörige im Atemschutzeinsatz einer solchen Belastung ausgesetzt sind und in wie vielen Fällen eine erhöhte CO-Belastung unbeachtet bleibt. Des Weiteren sollen Faktoren untersucht werden, die diese Belastung möglicherweise beeinflussen. Darunter finden sich sowohl physiologische Faktoren, Unterschiede in der persönlichen Schutzausrüstung, als auch die Frage nach individuellen Verhaltensweisen, die die Sicherheit der Schutzausrüstung beeinflussen. Es wird untersucht, ob sich die Sicherheitslage vom Training zum Realeinsatz unterscheidet.

Daraus ergeben sich folgenden Fragestellungen:

1. Können erhöhte Carboxyhämoglobinwerte bei Einsatzkräften unter Übungsbedingungen festgestellt werden? Können erhöhte Carboxyhämoglobinwerte bei Einsatzkräften im Realeinsatz festgestellt werden?
2. Gibt es Unterschiede zwischen den Carboxyhämoglobinwerten im Vergleich Übung zu Einsatzbedingungen?
3. Ergeben sich aus der Studie mögliche Hinweise auf Verhaltensweisen, welche die Höhe des Carboxyhämoglobinwertes in beiden Szenarien beeinflussen?
4. Gibt es Unterschiede zwischen den Carboxyhämoglobinwerten im Vergleich Normal- zu Überdruckmaskensystemen?

Aus der Beantwortung dieser Fragen wird ein Bild der Gefährdungslage von Atemschutzgeräteträgern abgeleitet, sowie mögliche Ursachen der CO-Belastung aufgezeigt, um diese Belastungen in Zukunft zu reduzieren.

4 Material und Methode

4.1 Studiendesign

4.1.1 Art der Studie

In der vorliegenden prospektiven Beobachtungsstudie zum Thema „Carboxyhämoglobin nach Brandgasexposition - Eine Untersuchung zur postexpositionellen Belastung von Feuerwehreinsatzkräften“ wurden Daten von Feuerwehreinsatzkräften der Landkreise Göttingen, Marburg und Northeim mittels eines Fragebogens, so wie mehrerer pulsoxymetrischer Messungen erhoben. Die für den Konsens notwendige Aufklärung erfolgte durch den jeweiligen Untersucher. Dabei wurde betont, dass die Teilnahme freiwillig sei und die Datenerhebung anonym erfolge. Das Forschungsprojekt wurde der Ethikkommission des Fachbereichs Humanmedizin der Philipps Universität Marburg vorgelegt und von dieser unter dem Aktenzeichen 83/08 genehmigt.

4.1.2 Beschreibung des Untersuchungsaufbaus

Die Untersuchung wurde im Zeitraum November 2008 bis April 2011 durchgeführt. Die Studienteilnehmer waren Atemschutzgeräteträger der Feuerwehren der Stadt Göttingen, der Stadt und des Landkreises Marburg-Biedenkopf, sowie der Stadt Northeim. Da Unterschiede im Verhalten der Feuerwehreinsatzkräfte zwischen Übung und Realeinsatz erwartet wurden, erfolgten die Messungen in zwei Gruppen. Es wurde davon ausgegangen, dass während der Atemschutzausbildung gelehrt Sicherheitsmaßnahmen im Übungsszenario gut, und im Einsatzfall weniger gut befolgt werden. Es wurde erwartet, dass dies Auswirkungen auf die zu erhebenden Messwerte hat.

Als Studienteilnehmer wurden in die Übungsgruppe Feuerwehreinsatzkräfte der Stadt Göttingen, die als Atemschutzgeräteträger bei den Feuerwehrtage in Brandsimulationscontainer der Firma Feurex in Potzwenden, Kreis Göttingen ausgebildet wurden, aufgenommen. Im Rahmen des Übungsszenarios wurden die Daten durch die Doktorandin erhoben. Bei den Studienteilnehmern der Realeinsatzgruppe handelt es sich um Mitglieder der Freiwilligen Feuerwehren der Stadt und des Kreises Marburg-Biedenkopf, sowie der Freiwilligen Feuerwehr der Stadt Northeim. Sie wurden bei unterschiedlichen Brandeinsätzen im obengenannten Zeitraum in den

Kreisen Marburg und Northeim, sowie der Stadt Marburg als Atemschutzgeräteträger eingesetzt und (nach diesem Einsatz) in die Studie aufgenommen. Die Daten dieser Studienteilnehmer wurden durch den stellvertretenden Leiter der Feuerwehr Marburg, den Kreisbrandinspektor des Kreises Marburg-Biedenkopf, die Messgruppe der Freiwilligen Feuerwehr Marburg-Ockershausen und den Leiter der Arztgruppe der Feuerwehrbereitschaft 4 des Landkreises Northeim erhoben.

Im Rahmen des Übungsszenarios erfolgte die Information und Aufklärung über die Teilnahme der Studie mündlich und mit Hilfe eines Informationsblattes. Im Anschluss daran bestätigten die Studienteilnehmer ihre Teilnahme schriftlich auf dem Einwilligungsbogen. Vor dem Übungsdurchgang erfolgte die erste pulsoxymetrische Messung der Studienteilnehmer. Das Messergebnis wurde auf einem Fragebogen festgehalten und dem Teilnehmer ausgehändigt. Direkt im Anschluss an den Übungsdurchgang erfolgte die zweite Messung, deren Ergebnisse wiederum auf dem Fragebogen des jeweiligen Atemschutzgeräteträgers festgehalten wurden. In einer etwa zehnminütigen Regenerationsphase erhielten die Teilnehmer die Möglichkeit den Fragebogen unbeaufsichtigt auszufüllen. Im Anschluss daran wurde die dritte Messung durchgeführt, die Messergebnisse notiert und der Fragebogen daraufhin wieder eingesammelt.

Im Falle der realen Brandeinsätze erfolgte die Aufklärung und Einwilligung der Atemschutzgeräteträger durch den Untersucher direkt nach dem Einsatz, wenn die Einsatzkräfte sich bei der Atemschutzüberwachung zurückmeldeten. Gleich darauf erfolgte die erste Messung. Eine Messung vor dem Einsatz entfiel. Auch hier wurden in der anschließenden Regenerationszeit die Fragebögen unbeaufsichtigt ausgefüllt und vom Untersucher nach der zweiten Messung wieder eingesammelt.

4.2 Messinstrumente

4.2.1 Messgerät

Für die pulsoxymetrische Messung wurden vier Rainbow-Set Rad-57 Puls-CO-Oxymeter der Firma Masimo eingesetzt. Dessen Messgenauigkeit, sowie das Messverfahren wurden in Kapitel 2.2.3 ausführlich erläutert. Zwei der eingesetzten Geräte haben die zusätzliche Funktion den Methämoglobinwert und den Perfusionsindex zu bestimmen, bei den anderen beiden fehlt diese Funktion.

4.2.2 Fragebogen

Die in dieser Studie zu erhebenden Daten wurden mittels eines einseitigen Fragebogens abgefragt. Dieser enthält neben einer Messwertetabelle, die durch den Untersucher ausgefüllt wurde, auch 16 weitere Fragen, die durch den Studienteilnehmer selbstständig und unbeaufsichtigt auszufüllen waren. Dabei war es den Teilnehmern jederzeit möglich, etwaige Verständnisfragen an den Untersucher zu richten. Der Fragebogen beginnt mit der Frage nach dem Einsatzort und dem Einsatzdatum. Des Weiteren wurden die Initialen des Atemschutzgeräteträgers notiert, um eine versehentliche Vermischung der Bögen in teilweise unübersichtlichen Einsatzszenarien zu verhindern. Die Initialen wurden später unkenntlich gemacht.

4.2.2.1 Angaben zur Person

In den ersten drei Fragen des Fragebogens werden Angaben zur Person erbeten. Da einige Studien belegen, dass es mit zunehmendem Alter zu einer starken Mortalitätszunahme durch Rauchgasvergiftungen kommt [97], wird zunächst nach Alter und Gewicht gefragt. Diese Fragen sind numerisch zu beantworten. Weitere Studien vermuten einen Zusammenhang zwischen der Toleranz gegenüber CO und dem Geschlecht, weshalb in Frage 3 das Geschlecht erfragt wird [17, 57, 72]. Es können die Möglichkeiten „männlich“ oder „weiblich“ angekreuzt werden. In der nächsten Frage wird der Teilnehmer gebeten anzugeben, ob er Raucher ist. Diese Frage ist mit „Ja“ oder „Nein“ zu beantworten. Da Raucher durch die unvollständige Verbrennung von Tabakrauch einer höheren CO-Belastung als Nichtraucher ausgesetzt sind, weichen ihre COHb Normalwerte von denen der Nichtraucher ab, was in der Beurteilung ihrer Messergebnisse berücksichtigt werden muss [93].

4.2.2.2 Verhalten im Einsatz

In der fünften Frage ist anzukreuzen, ob der Einsatz mit einer Normal- oder einer Überdruckgerät durchgeführt wurde (siehe Kapitel 2.1.1). Im Überdrucksystem führt ein konstanter Luftdruck bei Undichtigkeiten zum Ausstrom von Atemluft. Dies verhindert ein Einatmen von Brandgasen an der Maske vorbei und verringert das Risiko einer Rauchgasvergiftung [14]. Es ist zu erwarten, dass es bei Überdrucksystemen weniger häufig zu einer CO-Belastung des Geräteträgers kommt als bei Normaldrucksystemen. In den Fragen sechs bis zehn werden Angaben über das Verhalten im Einsatz erbeten. Alle Fragen sind entweder mit „Ja“ oder „Nein“ zu beantworten. Zunächst wird nach

der Durchführung der Maskendichtprobe gefragt. Diese ist vor jedem Atemschutzinsatz unbedingt durchzuführen um die Dichtigkeit der Maske zu überprüfen. Dabei ist zu beachten, dass die Probe erst durchgeführt wird, sobald alle anderen Ausrüstungsgegenstände, vor allem die Flammenschutzhaube, die über die Maske gezogen wird, angelegt sind. Da viele rauchende Feuerwehrleute in Warte- und Erholungszeiten die Gelegenheit nutzen, um eine Zigarette zu rauchen, dies die nachfolgende Messung jedoch erheblich beeinflussen kann, wird in der folgenden Frage erfragt, ob vor der Messung geraucht wurde. Die Probanden, die diese Frage mit „Ja“ beantworten, werden in Frage neun aufgefordert anzugeben, ob dies bereits vor der ersten Messung geschehen ist. Probanden, die diese Frage mit „Nein“ beantworten, überspringen Frage neun und setzen die Befragung mit Frage zehn fort. Hier wird gefragt, ob die Einsatzkraft die Einsatzjacke nach dem Einsatz gelüftet und ausgezogen hat. Auch dies ist eine Weisung aus der Atemschutzausbildung, die verhindern soll, dass der Geräteträger nach dem Absetzen des Gerätes die Brandgase einatmet, die während des Einsatzes in die Kleidung gelangt sind und nach dem Einsatz aus dieser ausgasen [34, 27, 47, 49]. Im Folgenden wird nach der Einsatzdauer und dem Luftverbrauch in bar gefragt. Beide Fragen sind durch Einfügen eines numerischen Wertes zu beantworten. Die Frage 14 adressiert die subjektive Einsatzerfahrung. Dabei kann zwischen den Möglichkeiten „wenig erfahren“, „erfahren“ und „sehr erfahren“ gewählt werden.

4.2.2.3 Beschwerden und Behandlung

Daran anschließend folgt eine Auflistung der häufigsten Symptome einer CO-Vergiftung [52, 71]. Dabei sind aufgetretene Symptome anzukreuzen. Ein Nichtankreuzen wird als Nicht-Vorhandensein der Symptome gewertet. Der Teilnehmer hat die Möglichkeit „Schwindel“, „Kopfschmerz“, „Luftnot“, „Sehstörungen“ und „verrußte Atemwege“ anzukreuzen. Die Fragen 16 und 17 sind die letzten Fragen des Fragebogens und werden vom Untersucher ausgefüllt. In der Frage 16 ist mit „Ja“ oder „Nein“ zu beantworten, ob eine weitere Behandlung vorgenommen wurde. Wird diese Frage mit „Ja“ beantwortet, so ist in der folgenden Frage in eigenen Worten zu erläutern, welche Maßnahmen getroffen wurden. Wird diese Frage mit „Nein“ beantwortet, bleibt die Zeile frei.

4.2.2.4 Tabelle für die RAD 57 Ergebnisse

Bei jedem Studienteilnehmer wurden in den Übungsszenarien dreimal und im Realeinsatz zweimal durch einen Untersucher pulsoxymetrische Messwerte mittels des Rad-57 Puls-CO-Oxymeters erhoben. Diese Messwerte werden in eine Tabelle auf dem Fragebogen eingetragen. In der Tabelle werden drei Untersuchungszeitpunkte unterschieden: „vorher (nur im Übungsfall)“, „direkt nach dem Einsatz“ und „10 min nach dem Einsatz“. Die erhobenen Messwerte sind die Sauerstoffsättigung „SpO₂“ und der Carboxyhämoglobinwert „SpCO“ in Prozent, die Herzfrequenz in bpm, sowie der Methämoglobinwert „MetHb“ und der Perfusionsindex „PI“ bei den Geräten, die diese erfassen können. Alle Werte werden in Prozent angegeben [62].

4.3 Statistische Verfahren zur Datenauswertung

Die in dieser Studie erhobenen Daten werden mittels einer deskriptiven Datenanalyse ausgewertet. Mittels des Anderson-Darling-Testes werden die erhobenen quantitativen Daten auf Normalverteilung hin überprüft. Es werden Mediane und Perzentilen der COHb-Werte berechnet, sowie Mittelwerte und Standardabweichungen der übrigen quantitativen Daten; außerdem Mittelwerte, Standardabweichung, Standardfehler und Konfidenzintervalle der qualitativen Daten. Der zeitliche Verlauf der COHb-Werte wird mittels des Wilcoxon Rangsummentests untersucht. Zum Vergleich der quantitativen Daten der Übungsgruppe mit den Daten der Realeinsatzgruppe werden mittels des Mann-Whitney-U-Tests Hypothesentests durchgeführt, die bestehende statistisch signifikante Unterschiede zwischen beiden Szenarien aufzeigen sollen. Die Signifikanz wurde angegeben bei $p < 0,05$.

5 Ergebnisse

5.1 Beschreibung des untersuchten Kollektivs

Das untersuchte Kollektiv besteht aus zwei Gruppen: Zum einen die Übungsgruppe und zum anderen die Realeinsatzgruppe. Sowohl Finteis et al. [28], als auch Stewart et al. [90] haben im Rahmen ihrer Studien einen signifikanten Unterschied zwischen den COHb-Werten von Rauchern und Nichtrauchern festgestellt. Deshalb werden auch zur Bewertung der in dieser Studie erhobenen Werte Raucher und Nichtraucher getrennt betrachtet. [28, 90] Da das Rauchen durch die unvollständige Verbrennung des Tabaks einen großen Einfluss auf die Höhe des COHb-Wertes hat, gelten für diese beiden Gruppen unterschiedliche Normalwerte und somit auch unterschiedliche Grenzen für erhöhte Werte.

Die Normalwerte der Nichtraucher betragen in der Regel zwischen 0,4 und 1,6% und sind in nahezu allen Fällen kleiner als 3% COHb [28, 59, 60, 93]. Die Standardabweichung der verwendeten Pulsoxymeter liegt bei $\pm 3\%$ [8, 20, 63, 100]. Die in der Literatur angegebene Obergrenze des Normalbereichs plus eine Standardabweichung, also ein Wert $\geq 6\%$ gilt hier als erhöhter Wert für Nichtraucher.

Die Normalwerte der Raucher liegen in der Regel zwischen 3 und 6% und sind nur in seltenen Fällen größer als 9% [28, 59, 60, 93]. In dieser Studie gilt ein Wert von $\geq 12\%$ (angegebene Obergrenze des Normalbereichs plus eine SD) als erhöhter Wert für Raucher.

Die Übungsgruppe besteht aus 84 Atemschutzgeräteträgern der Freiwilligen Feuerwehren der Stadt Göttingen. Sie setzt sich aus 83 männlichen Feuerwehrereinsatzkräften und einer Frau zusammen. Das entspricht einem Anteil von 1,2%. Die Teilnehmer dieser Gruppe sind im Durchschnitt 29,6 Jahre alt und wiegen 85,37 kg. Sie unterteilen sich in 28 Raucher (33,3%) und 56 Nichtraucher (66,7%).

58 Atemschutzgeräteträger trugen bei ihrem Einsatz Normaldruckgeräte (69,05%). 25 Atemschutzgeräteträger trugen bei ihrem Einsatz Überdruckgeräte (29,8%). Ein Teilnehmer machte hierzu keine Angabe. Die Teilnehmer dieser Gruppe waren im Durchschnitt 23,57 min im Einsatz und verbrauchten dabei 151,41 bar Atemluft. Ihre Einsatzerfahrung beschrieben 36 Teilnehmer (44%) mit „wenig erfahren“, 31 Teilnehmer (36%) mit „erfahren“ und 11 Teilnehmer (13%) mit „sehr erfahren“, sechs

Einsatzkräfte (7%) machten keine Angabe bezüglich ihrer Einsatzerfahrung (siehe Abbildung 15).

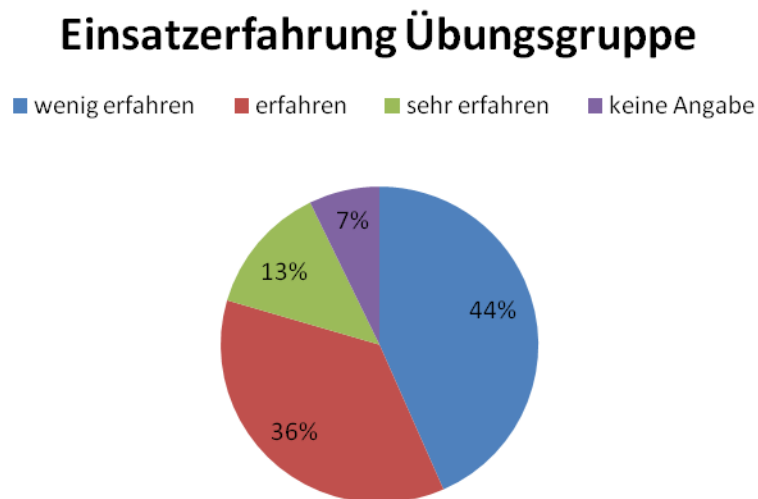


Abbildung 15: Einsatzerfahrung Übungsgruppe

Die Realeinsatzgruppe besteht aus 82 Atemschutzgeräteträgern der Freiwilligen Feuerwehren der Städte Northeim und Marburg, sowie des Landkreises Marburg-Biedenkopf. Sie setzt sich aus 71 Männern (86,6%) und zehn Frauen (12,2%) zusammen, einmal wurde zum Geschlecht keine Angabe gemacht (1,2%). Der Altersdurchschnitt dieser Gruppe beträgt 28,95 Jahre, ihr Durchschnittsgewicht 81,4kg. Diese Gruppe unterteilt sich in 33 Raucher, das entspricht einem Anteil von 40,2%, und 49 Nichtraucher (59,8%). 25 Einsatzkräfte dieser Gruppe gingen mit einem Überdruckgerät in den Einsatz (30,49%) und 56 Einsatzkräfte trugen Normaldruckgeräte (68,3%). Eine Einsatzkraft machte diesbezüglich keine Angabe (1,2%). Im Rahmen der realen Einsätze waren die Atemschutzgeräteträger durchschnittlich 22,3 min im Einsatz und hatten einen Atemluftverbrauch von 183,6 bar. Die subjektive Einschätzung der Einsatzerfahrung dieser Gruppe zeigt Abbildung 16. 24 Einsatzkräfte bezeichneten sich selbst als „wenig erfahren“ (29%), 48 betrachteten sich als „erfahren“ (59%) und acht als „sehr erfahren“ (10%). Zwei Teilnehmer machten hierzu keine Angabe (2%).

Einsatz Erfahrung Realeinsatzgruppe

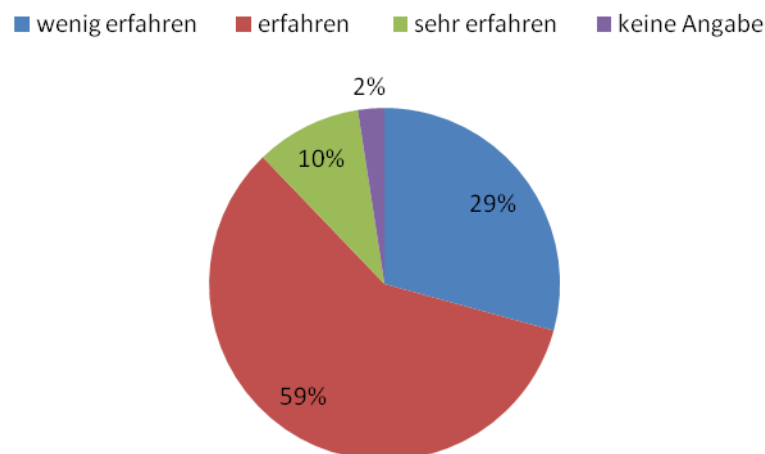


Abbildung 16: Einsatz Erfahrung der Realeinsatzgruppe

5.2 Messwerte der Übungsgruppe

5.2.1 COHb-Werte Nichtraucher

5.2.1.1 Deskriptive COHb-Werte

In der Übungsgruppe sind die COHb-Werte von insgesamt 84 Teilnehmern zu drei Zeitpunkten gemessen worden. Zunächst vor der Übung, direkt im Anschluss an die Übung und dann nach weiteren 10 Minuten.

In den folgenden Abbildungen wird in Form eines Säulendiagramms dargestellt welche COHb-Werte erhoben werden konnten und wie viele der Teilnehmer welchen COHb-Wert aufwiesen. Dazu werden die erhobenen COHb-Werte in Säulen von 0-2%, 2,1-4%, 4,1-6%, 6,1-8%, 8,1-10%, 10,1-12%, 12,1-14%, 14,1-16% und 16,1-18% unterteilt und ihnen die jeweilige Anzahl der Teilnehmer, deren Messwerte im entsprechenden Bereich lagen, zugeordnet. Die Anzahl der Teilnehmer wird sowohl als absolute Zahl, als auch als relativer Anteil am Gesamtkollektiv der Gruppe angegeben. Die Abbildungen 14-16 zeigen dabei die erhobenen Messwerte der Nichtraucher zu den drei Messzeitpunkten im Übungsszenario.

Insgesamt wurden im Rahmen des Übungsszenarios die Daten von 56 Nichtrauchern erhoben. Vor Aufnahme der Übung zeigen 40 Teilnehmer COHb-Werte zwischen 0 und 2%. Sieben Teilnehmer haben Werte zwischen 2,1 und 4%, sechs Teilnehmer Werte zwischen 4,1 und 6% und jeweils ein Teilnehmer einen Wert zwischen 6,1 und 8%,

sowie zwischen 8,1 und 10%. Von einem Teilnehmer liegt kein Messergebnis vor (siehe Abbildung 17).

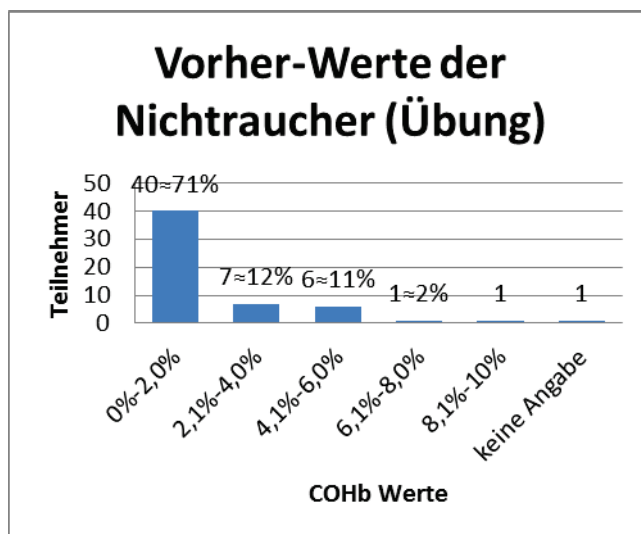


Abbildung 17: Vorher-Werte der Nichtraucher (Übung)

Unmittelbar nach Beendigung der Übung konnten bei 55 Teilnehmern COHb-Werte $\leq 6,0\%$ gemessen werden. Ein Teilnehmer hatte einen COHb-Wert zwischen 8,1% und 10% (genaue Verteilung siehe Abbildung 18).

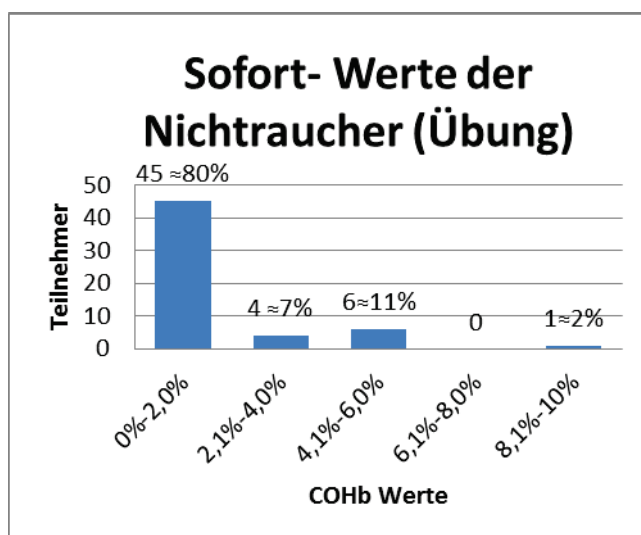


Abbildung 18: Sofortwerte der Nichtraucher (Übung)

Zehn Minuten nach der Übungsdurchführung konnten bei 49 Teilnehmern COHb-Werte zwischen 0% und 6,0% gemessen werden. Ein Teilnehmer hatte einen COHb-Wert zwischen 6,1% und 8,0% und ein Teilnehmer einen COHb-Wert zwischen 16,1% und 18%. (genaue Angaben siehe Abbildung 19)

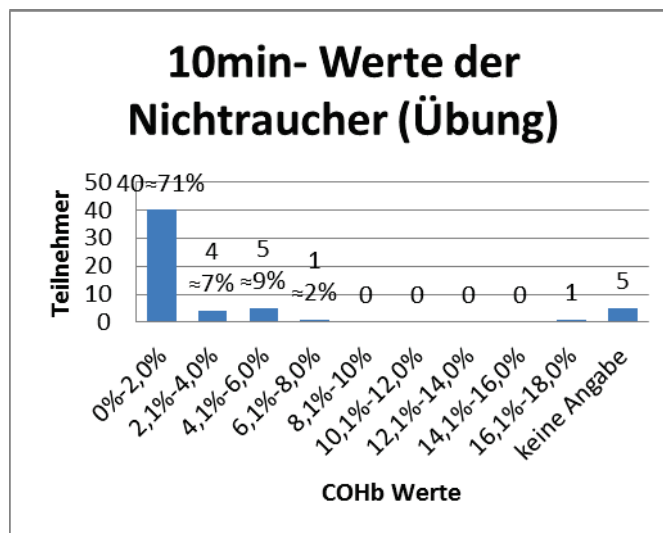


Abbildung 19: 10-min-Werte der Nichtraucher (Übung)

Zwei von 56 Nichtrauchern haben bei der Messung unmittelbar nach der Übung erhöhte Werte über 6% (3,6%). Die erhöhten Werte lagen bei 6% und 9%. Drei von 56 Teilnehmern haben bei den 10 min Werten erhöhte Werte (5,3%), wobei fünfmal keine Angabe gemacht wurde (8,9%). Die Werte lagen bei 6%, 7% und 18%.

5.2.1.2 Statistische Größen

Nach einer Untersuchung auf Normalverteilung mittels des Anderson-Darling-Tests handelt es sich bei COHb-Werten um eine nicht normalverteilte quantitative Variable. Aus diesem Grund können für die gemessenen COHb-Werte ausschließlich Mediane (MD) und Perzentile (hier das 90.Perzentil) (PZ) angegeben werden.

Diese betragen für die Nichtraucher im Übungsdurchgang:

Vor dem Streckendurchgang: MD: 1,0; 90.PZ: 5
 sofort nach dem Streckendurchgang: MD: 0; 90.PZ.: 5
 10 min nach dem Streckendurchgang: MD: 0; 90.PZ.: 5

5.2.2 COHb-Werte Raucher

5.2.2.1 Deskriptive COHb-Werte

Die Abbildungen 17-19 zeigen die erhobenen Messwerte der Raucher zu den drei Messzeitpunkten im Übungsszenario. Insgesamt wurden in dieser Gruppe die Daten von 28 Teilnehmern erhoben. Alle 28 Teilnehmer zeigten vor der Übungsdurchführung COHb-Werte zwischen 0 und 10,0% (nähere Angaben siehe Abbildung 20).

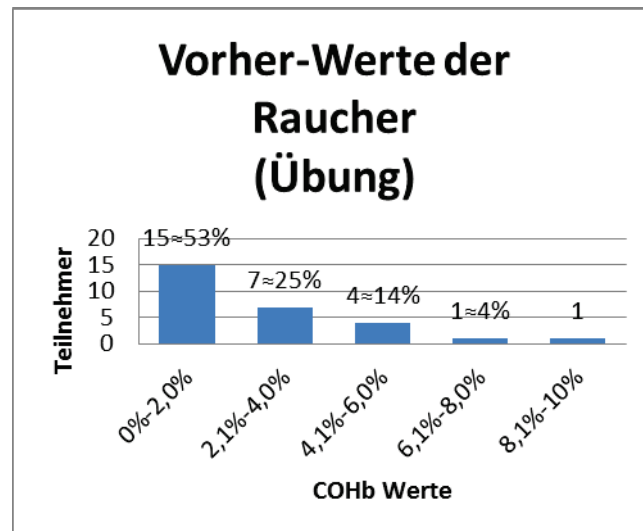


Abbildung 20: Vorher-Werte der Raucher (Übung)

Unmittelbar nach dem Übungsdurchgang zeigten bei den Rauchern der Übungsgruppe alle Teilnehmer einen COHb-Wert zwischen 0 und 8,0%. (nähere Angaben siehe Abbildung 21).

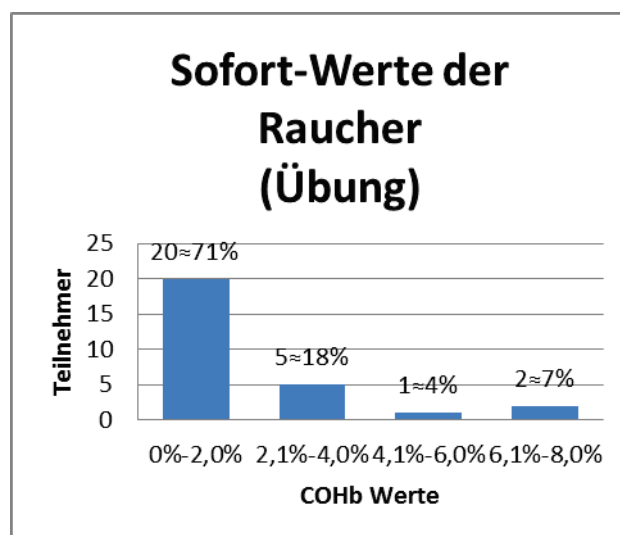


Abbildung 21: Sofortwerte der Raucher (Übung)

Zehn Minuten nach dem Übungsdurchgang konnten folgenden Werte bei den Teilnehmern gemessen werden: 27 Teilnehmer mit Werten zwischen 0 und 8,0% und einen Teilnehmer mit einem COHb-Wert zwischen 14,1 und 16% (siehe Abbildung 22).

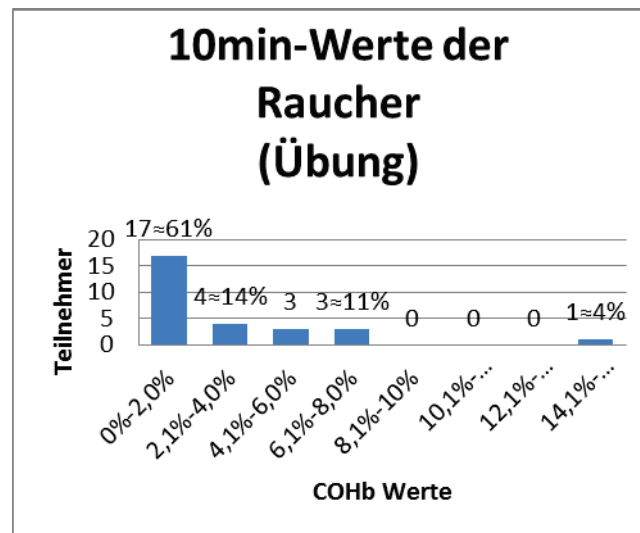


Abbildung 22: 10-min Werte der Raucher (Übung)

Keiner der 28 Raucher zeigte einen erhöhten Sofortwert $\geq 12\%$. Bei einem von 28 Rauchern war der 10 min-Wert über 12% erhöht. Das entspricht einem Anteil von 3,6% der Teilnehmer. Der Wert betrug 15% COHb und der Teilnehmer gibt an, vor der Messung geraucht zu haben. Insgesamt geben 10 von 28 (36%) Rauchern an im Rahmen der Untersuchung geraucht zu haben.

5.2.2.2 Statistische Größen

Aus den gemessenen COHb-Werten aller teilnehmenden Raucher errechnen sich folgende Werte:

Vor dem Streckendurchgang: MD: 2,0; 90.PZ: 5

sofort nach dem Streckendurchgang: MD: 1,0; 90.PZ: 4

10 min nach dem Streckendurchgang: MD: 2,0; 90.PZ: 7

Vorausgehende Studien [20, 39] bezeichnen Rauchen als einen Faktor mit erheblichem Einfluss auf den COHb-Wert. Betrachtet man nur die Teilnehmer, die angaben im Laufe der Untersuchung nicht geraucht zu haben, ergeben sich folgende Werte:

Vor dem Streckendurchgang: MD: 1,5; 90.PZ: 5,3

sofort nach dem Streckendurchgang: MD: 1,0 ; 90.PZ: 4,3

10 min nach dem Streckendurchgang: MD: 2,0 ; 90.PZ: 7,3

5.2.3 COHb-Werte im zeitlichen Verlauf

Trägt man die COHb-Werte der Teilnehmer im zeitlichen Verlauf für jeden einzelnen Teilnehmer nacheinander auf, so zeigt die Wertekurve bei zehn von 56 Nichtrauchern, das entspricht 17,9%, einen v-förmigen Verlauf. Das heißt, dass es nach einer Abnahme der Sofort-Werte im Vergleich zu den vorherigen Messungen, zu einem Anstieg der Werte nach 10 min kommt. Keiner dieser Teilnehmer gibt an, geraucht zu haben. Zur Veranschaulichung zeigt Abbildung 23 exemplarisch den zeitlichen Werteverlauf der Teilnehmer 35 bis 43 da in der graphischen Darstellung die Schwankungen hier besonders gut zu sehen sind.

Bei 10 von 28 Rauchern, das entspricht einem Anteil von 35,7%, nahm die Wertekurve im zeitlichen Verlauf eine V-Form an. Drei dieser Teilnehmer geben an, zwischen der zweiten und der dritten Messung geraucht zu haben.

Bei insgesamt 9 von 56 Nichtrauchern (16%) und 5 von 28 Rauchern (18%) ist der Endwert dabei höher als der Ausgangswert. Bei den übrigen Teilnehmern war der Endwert COHb entweder gleich, oder unterhalb des Ausgangswertes.

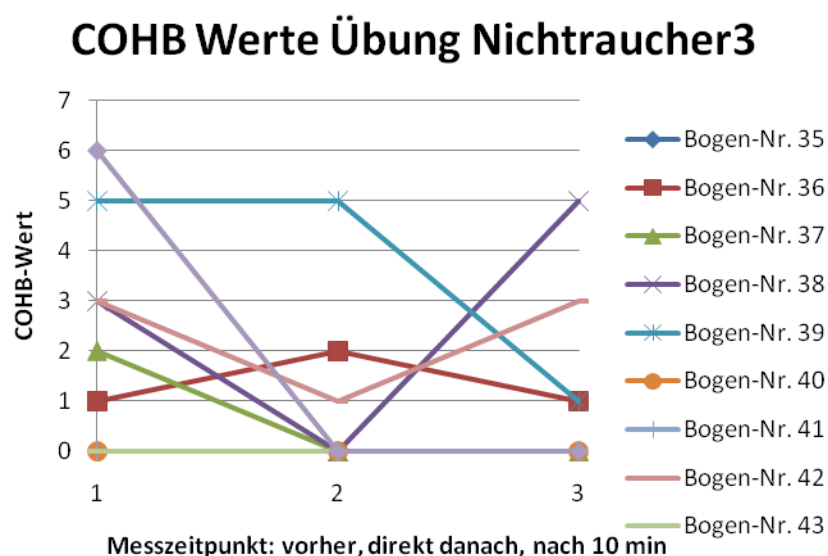


Abbildung 23: exemplarische CoHb-Werte im Verlauf

Diese in vielen einzelnen Fällen beobachtete Tendenz lässt sich für die Gesamtheit der COHb-Werte aller Teilnehmer statistisch bestätigen. Mittels einer Vorher-Nachher-Betrachtung für verbundene Variablen (Wilcoxon-Test) zeigt sich ein statistisch signifikanter Unterschied ($p=0,029$) zwischen den Messwerten aller Teilnehmer vor und

unmittelbar nach der Übung, sowie ($p=0,025$) zwischen den Sofortwerten und den Werten 10 Minuten später.

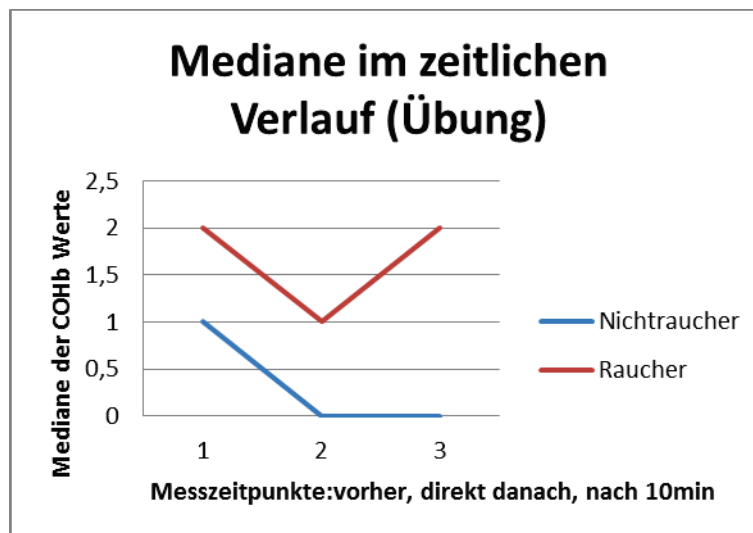


Abbildung 24: Mediane der COHb-Werte aller Teilnehmer im zeitlichen Verlauf

Bei sechs von 56 Nichtrauchern, das entspricht einem Anteil von 11%, kam es zwischen der ersten und der zweiten Messung zu einem Anstieg von 3-6% COHb (1 SD). Bei einem Nichtraucher (2%) kam es zwischen diesen Messungen zu einem Anstieg $\geq 6\%$ (2 SD).

Vier von 56 Nichtrauchern und somit 7% der Teilnehmer, wiesen einen Anstieg 3- 6% zwischen der zweiten und der dritten Messung auf. 2 Teilnehmer (4%) zeigten einen Anstieg $\geq 6\%$.

Sieben von 56 Nichtrauchern (13%) wiesen einen Abfall des COHb-Wertes von 3-6% und 3 (5%) einen Abfall von $\geq 6\%$ zwischen der ersten und zweiten Messung auf. Zwischen der zweiten und dritten Messung waren es zwei Teilnehmer (4%) im Bereich 3-6% und ein Teilnehmer (2%) im Bereich $\geq 6\%$.

Vier von 28 Rauchern (14%) zeigten bei der Messung des Sofortwertes einen Werteanstieg zwischen 3-6% im Vergleich zum Vorher-Wert. Zwei Probanden geben an, vor der Messung geraucht zu haben.

Bei fünf von 28 Rauchern, das sind 18%, konnte bei der Messung des 10 min-Wertes ein Wertanstieg von 3-6% im Vergleich zu dem Sofortwert nachgewiesen werden. Bei drei Rauchern (11%) war der Werteanstieg $\geq 6\%$. Drei dieser Teilnehmer geben an, vor der 10 min-Messung geraucht zu haben, drei geben an, nicht geraucht zu haben. Das entspricht jeweils 10,7% der Raucher.

Fünf von 28 Rauchern (17,9%) weisen einen Abfall des COHb-Wertes von 3-6% auf. Zwei (7%) zeigten einen Abfall $\geq 6\%$ zwischen der ersten und zweiten Messung. Zwischen der zweiten und dritten Messung ist dies bei einem Teilnehmer (4%) der Fall. Zwei Teilnehmer (7%) wiesen einen Abfall des COHb-Wertes zwischen 3-6% auf.

5.2.4 Weitere quantitative Daten

Zusätzlich zu den COHb-Werten misst das Pulsoxymeter weitere körperliche Parameter. Auch diese wurden bei den Messungen der Übungsgruppe erfasst.

Die durchschnittliche Sauerstoffsättigung betrug nach der Übung 95,7% (SD +/- 1,5%).

Die durchschnittliche Herzfrequenz betrug 129 bpm (SD +/-20,6 bpm). Von zwei Teilnehmern liegen keine Messwerte vor. 13 von 84 Teilnehmern zeigten nach der Übung eine kritische Herzfrequenz von ≥ 150 bpm (15,5%). Insgesamt überschritt 1 Teilnehmer der Übungsgruppe seine persönliche maximale Herzfrequenz (definiert als 220 bpm - Lebensalter). 22,6% erreichten ihre Dauerleistungsgrenze (75% der maximalen Herzfrequenz) [95]. Im Mittel wurden 67,5% der persönlichen maximalen Herzfrequenz erreicht.

Der MetHb Wert betrug im Durchschnitt 0,5% (SD +/- 0,6%). Bei einem Raucher kam es zu einer Methämoglobinämie von 5,3% ohne Angabe von Symptomen.

Der Mittelwert des Perfusionsindex beträgt 7,4 (SD +/- 2,8)

Überdruck-/Normaldruckgeräte

Durch eine zusätzliche Unterteilung der Teilnehmer nach ihrem Maskentyp lassen sich die COHb Mediane unter einem zusätzlichen Gesichtspunkt vergleichen. Dafür wird der Median der COHb-Werte unmittelbar nach der Übung/dem Einsatz betrachtet, da ein Unterschied nur zu diesem Zeitpunkt durch die unterschiedlichen Maskentypen bedingt sein kann.

Der Median der Nichtraucher mit Normaldruckmaske betrug 0, wobei ein Teilnehmer einen erhöhten COHb-Werte hatte. Der Median der Raucher mit Normaldruckmaske betrug 1,0 und kein Proband zeigte erhöhte Werte. Der Median der Nichtraucher mit Überdruckmaske betrug 0 und der der Raucher mit diesem Maskentyp 1,0. Ein Nichtraucher hatte einen erhöhten COHb Anteil.

5.2.5 Qualitative Daten

5.2.5.1 Nichtraucher

Direkt im Anschluss an die Messung nach der Übung bekamen die Teilnehmer die Möglichkeit unbeaufsichtigt, den beiliegenden Fragebogen auszufüllen. Dabei beantworteten 56 von 56 Teilnehmern die Frage ob vor der Übung eine Maskendichtprobe durchgeführt wurde, mit „ja“ (100%).

Die Frage, ob dies nach dem Aufsetzen der Flammenschutzhaube erfolgte, beantworteten 46 von 56 Einsatzkräften mit „ja“ (82,1%), neun mit „nein“ (16,1%) und ein Teilnehmer machte diesbezüglich keine Angabe (1,8%) (siehe Abbildung 25).

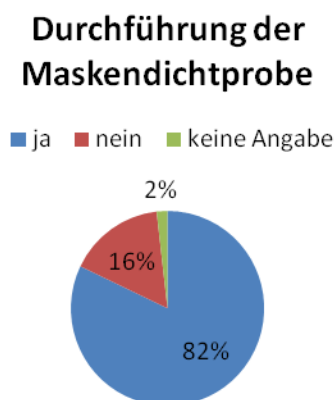


Abbildung 25: Durchführung der Maskendichtprobe nach Aufsetzen der Flammenschutzhaube Nichtraucher (Übung)

52 von 56 Teilnehmern gaben an, ihre Einsatzkleidung nach der Übung gelüftet zu haben (92,9%). Drei Teilnehmer verneinten dies (5,4%) und einer machte hierzu keine Angabe (1,8%).

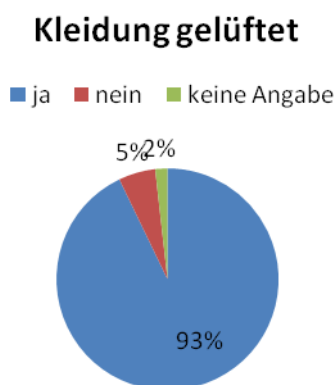


Abbildung 26: Angabe zum Lüften der Kleidung Nichtraucher (Übung)

5.2.5.2 Raucher

Von den teilnehmenden Rauchern dieser Gruppe beantworteten 27 von 28 die Frage nach dem Durchführen der Maskendichtprobe mit „ja“ (96,4%) und einer mit „nein“ (3,6%) (siehe Abbildung 27).

Durchführung Maskendichtprobe

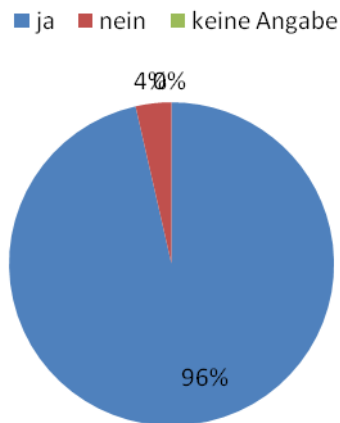


Abbildung 27: Durchführung der Maskendichtprobe Raucher (Übung)

Die Frage zum Zeitpunkt der Maskendichtprobe beantworteten 18 Teilnehmer mit „ja“ (64,3%), acht Teilnehmer mit „nein“ (28,6%) und zwei Teilnehmer gar nicht (7,1%) (siehe Abbildung 28)

Maskendichtprobe nach Aufsetzen der Flamschutzhaube

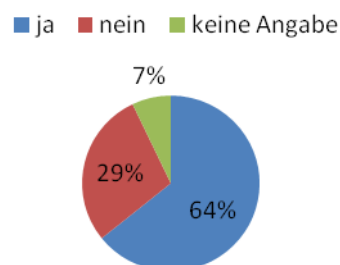


Abbildung 28: Angaben zur Durchführung der Maskendichtprobe nach Aufsetzen der Flamschutzhaube Raucher (Übung)

27 von 28 Probanden geben an ihre Einsatzkleidung nach der Übung gelüftet zu haben (96,4%). Ein Teilnehmer verneint dies (3,6%) (siehe Abbildung 29).

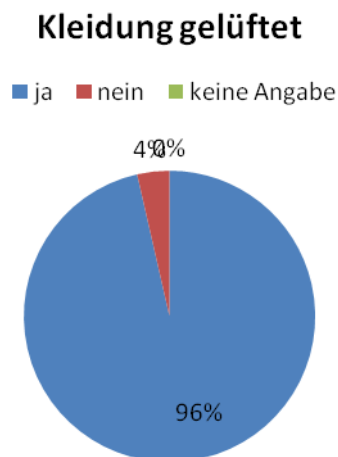


Abbildung 29: Lüften der Kleidung Raucher (Übung)

5.2.6 Symptome

Einer der 28 Raucher gibt an, nach der Übung Kopfschmerzen gehabt zu haben. Seine COHb-Werte betrugen dabei je 0%. Darüber hinaus wurden keine weiteren Symptome angegeben. Es wurde keine weitere Behandlung vorgenommen. In einem von 56 Fällen klagte ein Nichtraucher über Kopfschmerzen (1,8%). Seine COHb-Werte betrugen nach der Übung zu beiden Messzeitpunkten 5%. Ebenfalls ein Teilnehmer klagte nach der Übung über Luftnot. Seine COHb-Werte betrugen 0% und 1%. Zwei Teilnehmer gaben Schwindel an (3,57%). Sie zeigten COHb-Werte von 0% und 1%, beziehungsweise von 6% und 9%. Verrußte Atemwege oder Sehstörungen wurden nicht bemerkt. In keinem dieser Fälle wurde eine weitere Behandlung vorgenommen.

5.3 Messwerte der Realeinsatzgruppe

Auch die insgesamt 82 Teilnehmer der Realeinsatzgruppe werden zur Analyse der quantitativen Messwerte in Raucher und Nichtraucher unterteilt. Die Teilnehmer der Realeinsatzgruppe sind zu zwei Zeitpunkten gemessen worden: Zunächst direkt nach ihrem Atemschutzeinsatz und dann ein zweites Mal circa 10 min nach der ersten Messung.

5.3.1 COHb-Werte Nichtraucher

5.3.1.1 Deskriptive COHb-Werte

Auch die im Realeinsatz erhobenen COHb-Werte werden zur Veranschaulichung in Form von Säulendiagrammen dargestellt. Dabei wird die gleiche Einteilung der Säulen wie im Fall des Übungsszenarios gewählt. Die Anzahl der Teilnehmer wird auch hier sowohl als absolute Zahl, als auch als relativer Anteil am Gesamtkollektiv der Gruppe angegeben. Die Abbildungen 27 und 28 zeigen dabei die erhobenen Messwerte der Nichtraucher zu den beiden Messzeitpunkten im Realeinsatz.

Insgesamt wurden im Rahmen des Realeinsatzes die Daten von 49 Nichtrauchern erhoben. Zum Zeitpunkt der ersten Messung direkt nach dem Einsatz hatten 38 Einsatzkräfte einen COHb-Wert von 0% und 6,0%. Je ein Teilnehmer hatte Werte zwischen 6,1% und 8%, 8,1% bis 10% und 10,1% bis 12%. Von acht Teilnehmern liegen keine Messwerte vor (nähere Angaben siehe Abbildung 30).

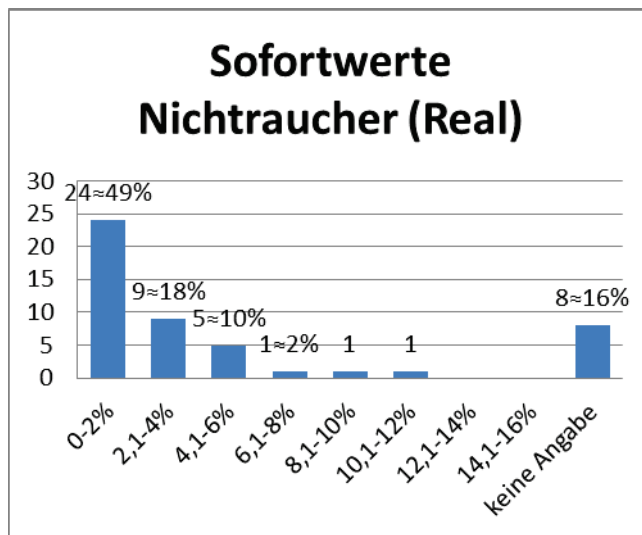


Abbildung 30: Sofortwerte der Nichtraucher (Real)

Nach einer zehnminütigen Regenerationsphase erfolgte die zweite Messung. Dabei zeigten 30 der teilnehmenden Atemschutzgeräteträger COHb-Werte zwischen 0% und 6,0%. Bei drei Einsatzkräften wurde ein COHb-Wert zwischen 6,1% und 8% gemessen. Zwei Teilnehmer hatten COHb-Werte zwischen 8,1% und 10%, bei einem Teilnehmer lag der Wert zwischen 10,1% und 12% (nähere Angaben siehe Abbildung 31).

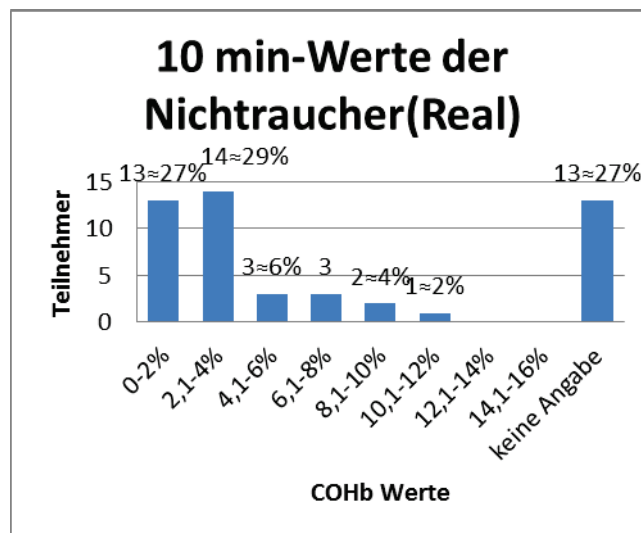


Abbildung 31: 10-min Werte der Nichtraucher (Real)

Zum Zeitpunkt der ersten Messung konnten in der Gruppe der Nichtraucher bei drei von 41 erfassten Geräteträgern erhöhte COHb-Werte $\geq 6\%$ gemessen werden. Das entspricht einem Anteil von 7,3% (von acht Teilnehmern liegen keine Daten vor).

Zum Zeitpunkt der zweiten Messung konnten in dieser Gruppe bei sechs von 36 Einsatzkräften erhöhte COHb-Werte $\geq 6\%$ festgestellt werden. Das entspricht einem Anteil von 16,7% (in diesem Fall liegen von 13 Teilnehmern keine Daten vor).

Im Fall zweier Atemschutzgeräteträgers ist es zwischen den beiden Messungen zu einem Anstieg des COHb-Wertes von 3-6% gekommen.

5.3.1.2 Statistische Größen

Auch für die Realeinsatzgruppe errechnen sich aus den gemessenen COHb-Werten von zwei verschiedenen Messzeitpunkten für die Nichtraucher Mediane und das 90. Perzentil

Sofort nach dem Einsatz: MD: 2,0; 90.PZ: 5

10 min nach dem Einsatz: MD: 3,0 ; 90.PZ:7

5.3.2 COHb-Werte Raucher

5.3.2.1 Deskriptive COHb-Werte

Im Rahmen des Realeinsatzes wurden die COHb-Werte von insgesamt 33 Rauchern erhoben. Dies zeigen die Grafiken 29 und 30. Bei 31 Rauchern der Realeinsatzgruppe wurden zum Zeitpunkt der ersten Messung direkt nach dem Einsatz COHb-Werte von 0%-10,0% gemessen. Von zwei Teilnehmern liegen keine Angaben vor (nähere Angaben siehe Abbildung 32).

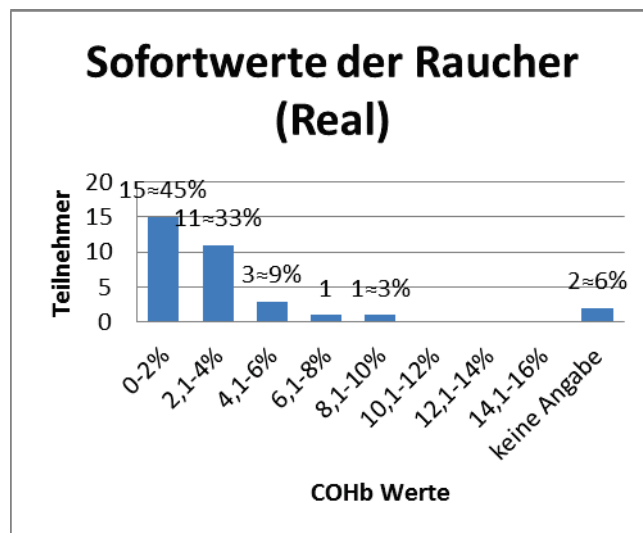


Abbildung 32: Sofortwerte der Raucher (Real)

Nach der Regenerationsphase wurden bei 29 Teilnehmern COHb-Werte zwischen 0% und 10,0% gemessen. Ein Teilnehmer hatte zu diesem Zeitpunkt einen COHb-Wert zwischen 14,1% und 16%. Von dieser Messung liegen bei drei Teilnehmern keine Ergebnisse vor (nähere Angaben siehe Abbildung 33).

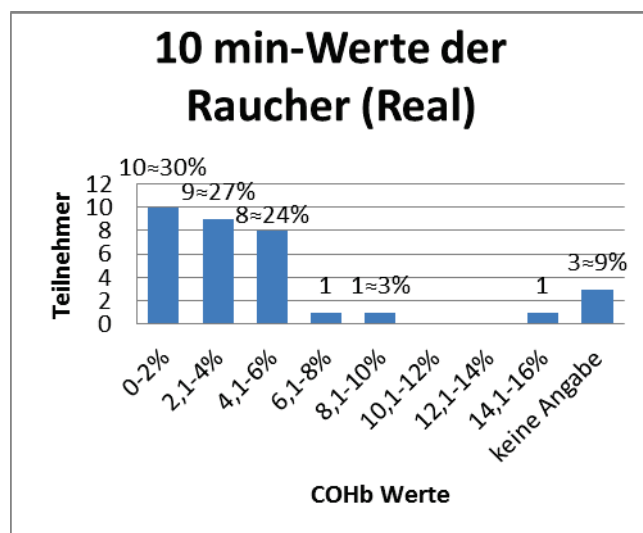


Abbildung 33: 10-min Werte der Raucher (Real)

Bei keinem der 33 Raucher der Realeinsatzgruppe konnte direkt nach dem Einsatz ein erhöhter COHb-Wert $\geq 12\%$ gemessen werden. 10 Minuten später wies eine Einsatzkraft einen erhöhten COHb-Wert von 15% auf. Der Teilnehmer gibt an, vor der Messung nicht geraucht zu haben. Insgesamt geben 12 von 33 (36%) an, während der Studienteilnahme geraucht zu haben.

5.3.2.2 Statistische Größen

Auch für die Realeinsatzgruppe ergeben sich aus den gemessenen COHb-Werten von zwei verschiedenen Messzeitpunkten folgende Werte:

Die COHb-Werte der Raucher ergeben:

Sofort nach dem Einsatz: MD: 3,0; 90.PZ: 5

10 min nach dem Einsatz: MD: 4,0; 90.PZ: 6

Betrachtet man auch hier nur die Teilnehmer, die angaben nicht geraucht zu haben, ergeben sich folgende Werte:

Sofort nach dem Einsatz: MD: 2,0; 90.PZ: 5

10 min nach dem Einsatz: MD: 3,0; 90.PZ: 6,8

5.3.3 COHb-Werte im zeitlichen Verlauf

Trägt man auch hier die COHb-Werte der Teilnehmer im zeitlichen Verlauf für jeden einzelnen Teilnehmer nacheinander auf, so zeigt die Wertekurve bei 17 von 49 Nichtrauchern (35%) einen ansteigenden Verlauf. Bei zwei von 49 Nichtrauchern (4%) ist dieser Anstieg 3-6% (1 SD). Bei 13 von 33 Rauchern, das entspricht einem Anteil von 39% war die Wertekurve im zeitlichen Verlauf ansteigend. Bei einem dieser Raucher (3%) war dieser Anstieg 3-6%. Bei einem weiteren war der Anstieg $\geq 6\%$. Sechs der Teilnehmer (18% aller Raucher, 46% der Raucher mit Wertanstieg) geben an, vor der letzten Messung geraucht zu haben.

Zur Veranschaulichung zeigt Abbildung 34 exemplarisch den zeitlichen Werteverlauf der Teilnehmer 51-60, wobei in diesem Fall die Bögen 51 und 52 von Rauchern stammen, die weiteren von Nichtrauchern.

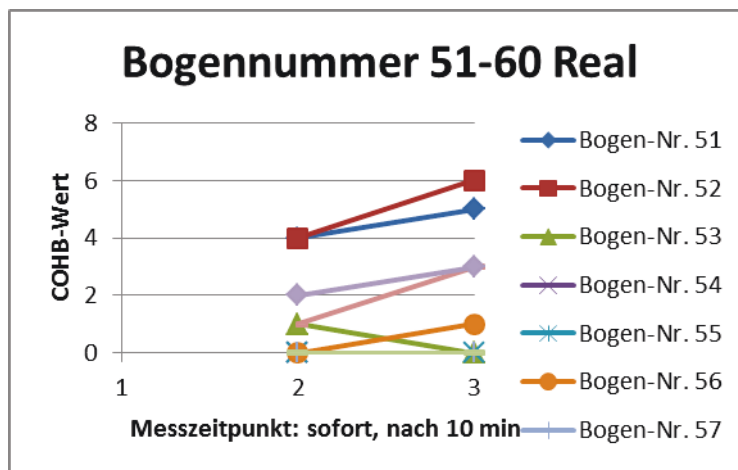


Abbildung 34: zeitlicher Verlauf COHb-Werte im Realeinsatz (exemplarisch)

Drei von 49 Nichtrauchern (6%) wiesen einen Abfall des COHb-Wertes zwischen den Messungen auf. Einmal betrug dieser Wert 3%. Zwei von 33 Rauchern (6%) wiesen einen sinkenden COHb-Wert zwischen den Messungen auf. Hier war kein Abfall größer als 3%

Die Abbildung 35 vermittelt einen Eindruck über den zeitlichen Verlauf der Mediane der COHb-Werte nach dem Realeinsatz. Die blaue Kurve beschreibt die COHb Werte der Nichtraucher, die rote Kurve die der Raucher.

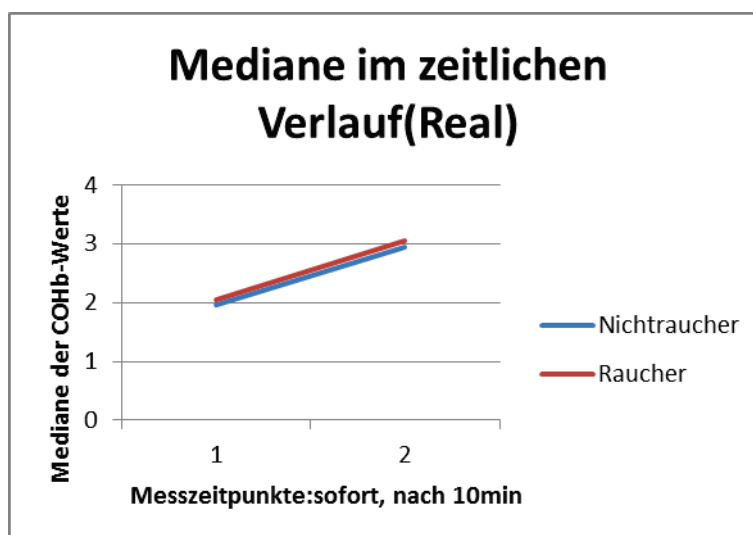


Abbildung 35: Mediane im zeitlichen Verlauf (Realeinsatz)

5.3.4 Weitere quantitative Daten

Neben den COHb-Werten erfasst das Pulsoxymeter noch weitere quantitative Messwerte wie den MetHb-Wert, den Perfusionsindex, die Sauerstoffsättigung und die Herzfrequenz. In der Realeinsatzgruppe lag der Mittelwert des MetHbs zum Zeitpunkt

der ersten Messung bei 0,3% (SD +/- 0,29%) und bei der zweiten Messung bei 0,6% (SD +/- 0,3%)

Der Mittelwert des Perfusionsindex beträgt 5,7 (SD +/- 3,1).

Der Mittelwert der Sauerstoffsättigung SpO₂ beträgt bei der ersten Messung 96,6% (SD +/- 1,5%) und bei der zweiten Messung 96,7% (SD +/- 1,8%).

Die Herzfrequenz beträgt bei der ersten Messung im Mittel 121 bpm (SD +/- 18 bpm) und bei der zweiten Messung im Mittel 109 bpm (SD +/- 15 bpm). Zum Zeitpunkt der ersten Messung hatten vier Teilnehmer eine Herzfrequenz von ≥ 150 bpm. Zum Zeitpunkt der zweiten Messung konnte bei keinem Geräteträger eine solche Frequenz gemessen werden. Neun Teilnehmer der gesamten Realeinsatzgruppe erreichten Frequenzen über ihrer Dauerleistungsgrenze (11%). Im Mittel wurden 63,1% der persönlichen maximalen Herzfrequenz (220-Lebensalter) [95] erreicht.

5.3.4.1 Überdruck-/Normaldruckgeräte

Auch die Messdaten der Realeinsatzgruppe werden noch einmal zusätzlich nach dem Maskentyp unterteilt.

Der Median der Nichtraucher mit Normaldruckmaske betrug 3,0, der der Raucher mit diesem Maskentyp 2,5. Fünf der Nichtraucher zeigten erhöhte Werte und keiner der untersuchten Raucher. Der Median der Nichtraucher mit einer Überdruckmaske betrug 1,0. Da nur von einem von zwei Rauchern mit Überdruckmaske ein COHb-Wert vorliegt, kann kein Median angegeben werden. In dieser Gruppe zeigte kein Teilnehmer erhöhte Werte.

5.3.5 Qualitative Daten

5.3.5.1 Nichtraucher

In der Gruppe der nichtrauchenden Atemschutzgeräteträger gaben 42 von 49 Teilnehmern an, die Maskendichtprobe vor dem Einsatz durchgeführt zu haben (85,7%). Sieben Teilnehmer (14,3%) machten hierzu keine Angabe (siehe Abbildung 36).

**Maskendichtprobe
durchgeführt**

■ ja ■ nein ■ keine Angabe

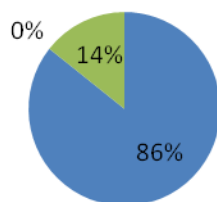


Abbildung 36: Durchführung der Maskendichtprobe der Nichtraucher im Realeinsatz

38 von 49 Einsatzkräften beantworteten die Frage, ob dies nach dem Aufsetzen der Flammenschutzhaube geschah, mit „ja“ (77,6%). Drei Teilnehmer antworteten mit „nein“ (6,1%) und acht machten keine Angabe (16,3%) (siehe Abbildung 37).

**Maskendichtprobe nach Aufsetzen
der Flammenschutzhaube**

■ ja ■ nein ■ keine Angabe

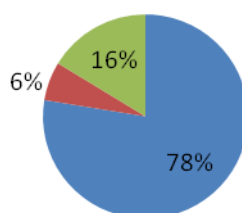


Abbildung 37: Durchführung der Maskendichtprobe nach Aufsetzen der Flammenschutzhaube der Nichtraucher im Realeinsatz

Die Frage nach dem Lüften der Einsatzjacke wurde von zehn Einsatzkräften mit „ja“ beantwortet (20,4%), von 31 verneint (63,3%) und von acht Teilnehmern gar nicht beantwortet (16,3%).

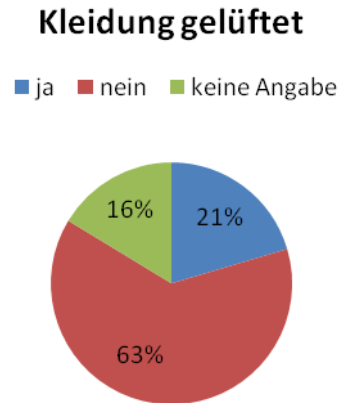


Abbildung 38: Lüften der Einsatzkleidung der Nichtraucher im Realeinsatz

5.3.5.2 Raucher

Bei der unbeobachteten Beantwortung der Fragen des Fragebogens gaben 32 Raucher an, vor dem Einsatz eine Maskendichtprobe durchgeführt zu haben (97%), ein Teilnehmer verneinte dies (3%).

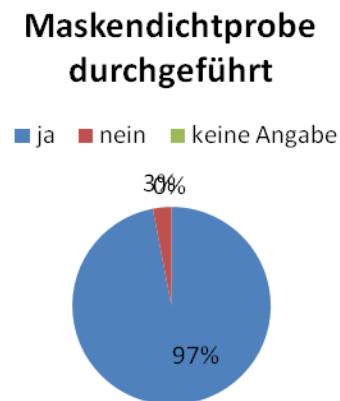


Abbildung 39: Durchführung der Maskendichtprobe der Raucher im Realeinsatz

Die Frage, ob die Maskendichtprobe nach dem Aufsetzen der Flammenschutzhaube erfolgte, beantworteten 31 von 33 Teilnehmern dieser Gruppe mit „ja“ (93,9%), einer mit „nein“ (3%) und ein Teilnehmer machte diesbezüglich keine Angabe (3%).

Maskendichtprobe nach Aufsetzen der Flammschutzhaube

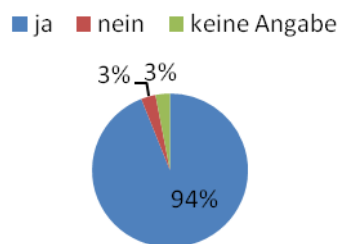


Abbildung 40: Durchführung der Maskendichtprobe nach dem Aufsetzen der Flammschutzhaube der Raucher im Realeinsatz

Die Frage nach dem Lüften der Einsatzkleidung wurde von drei von 33 Feuerwehreinsatzkräften mit „ja“ (9,1%), von 29 mit „nein“ (87,9%) und von einem Teilnehmer gar nicht beantwortet (3%).

Kleidung gelüftet

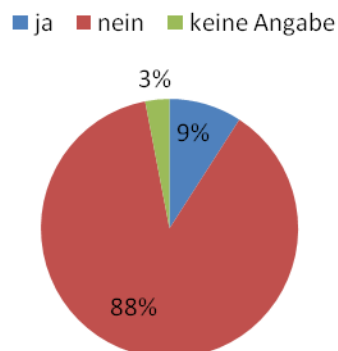


Abbildung 41: Lüften der Kleidung nach dem Realeinsatz Raucher

5.3.6 Symptome

In zwei Fällen klagten Teilnehmer nach dem Einsatz über Kopfschmerzen (4,1%) und in vier Fällen über Schwindel (8,2%). Alle weiteren Symptome wurden nicht angegeben.

In drei Fällen (6,1%) wurde im Anschluss an den Atemschutzeinsatz eine Behandlung der jeweiligen Geräteträger durchgeführt. Im ersten Fall handelte es sich um eine Kreislaufüberwachung bei einem Blutdruck von 90/60, ohne dass Symptome angegeben wurden. Der COHb-Wert betrug in diesem Fall 2%. Im zweiten Fall wurde bei einem massiven Flüssigkeitsverlust eine Kreislaufstabilisierung durch den anwesenden Notarzt

durchgeführt. Die angegebenen Symptome waren Kopfschmerzen und Schwindel. In diesem Fall betrug der COHb-Wert 6%. Im dritten Fall kam es bei angegebenen Kopfschmerzen und einem COHb-Wert von 12% zu einer Aufklärung über die Möglichkeit einer bestehenden CO-Intoxikation. In allen Fällen handelte es sich um Nichtraucher.

5.4 Hypothesentests

5.4.1 Vergleich der Einsatzszenarien

Im Folgenden soll untersucht werden, ob sich die COHb-Messwerte, die unter den unterschiedlichen Bedingungen Übung und Realeinsatz erfasst wurden, signifikant voneinander unterscheiden. Dazu werden die Mediane der COHb-Werte von Rauchern und Nichtrauchern zu jedem Messzeitpunkt in Übung und Realeinsatz mittels eines Tests auf Lageunterschied miteinander verglichen. Das Ziel dieses Hypothesentests ist es festzustellen, ob es in einem der beiden untersuchten Szenarien zu signifikant erhöhten COHb-Werten gekommen ist. Hieraus ließe sich eine signifikant höhere CO-Belastung in einem der beiden Szenarien ableiten.

Bei den Daten der COHb-Werte handelt es sich um nicht normalverteilte Werte (getestet mit dem Anderson-Darling-Test).

Der hier anzuwendende Test auf Lageunterschied ist daher der Mann-Whitney-U-Test. Als Voraussetzung wird hierfür angenommen, dass die Stichproben unabhängig und identisch nach einer Dichtefunktion verteilt sind.

Die getestete Hypothese ist, dass kein Unterschied zwischen den beiden Stichproben besteht. In den untenstehenden Berechnungen wird untersucht, ob diese Hypothese angenommen oder abgelehnt werden muss. Dabei erfolgt, wie oben, eine Unterteilung in Raucher und Nichtraucher und deren Werte zu den unterschiedlichen Messzeitpunkten.

5.4.1.1 Vergleich: Sofortwerte der Raucher

MD_{Übung}:1 , MD_{Real}:2

p=0,073

In diesem Fall kann die Hypothese auf einem Signifikanzniveau von $\alpha=7,5\%$ abgelehnt werden. Auf diesem Signifikanzniveau besteht ein statistisch signifikanter Unterschied zwischen den COHb-Werten der Raucher zwischen Übung und Realeinsatz.

5.4.1.2 Vergleich: 10 min-Werte der Raucher

MD_{Übung}:2 , MD_{Real}:3**p= 0,159**

In diesem Fall kann die Hypothese nicht abgelehnt werden.

5.4.1.3 Vergleich: Sofortwerte der Nichtraucher

MD_{Übung}:0 , MD_{Real}:2**p= 0,001**

Damit muss die Hypothese abgelehnt werden.

5.4.1.4 Vergleich: 10 min-Werte der Nichtraucher

MD_{Übung}:0 , MD_{Real}:3**p=0,000**

Damit muss die Hypothese abgelehnt werden.

Die Abbildung 42 vergleicht in Form eines Säulendiagrammes, die als Ausgangswerte der oben stehenden Hypothesentests verwendeten COHb-Mediane. Auch hierbei werden die Werte nach Raucher und Nichtraucher unterteilt. Zu jedem Messzeitpunkt (sofort und 10-min) werden die COHb-Mediane des Realeinsatzes (rot) und des Übungsszenarios (blau) gegenübergestellt.

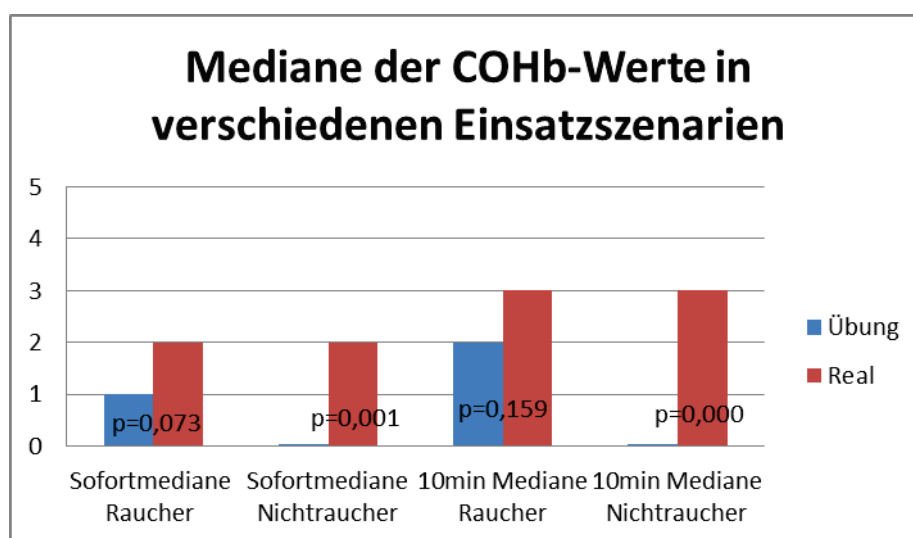


Abbildung 42: Mediane der COHb-Werte in verschiedenen Einsatzszenarien

5.4.2 Vergleich der Maskentypen

Es soll untersucht werden, ob sich die Messwerte, die unter den unterschiedlichen Bedingungen Normaldruck- und Überdruckmaske erfasst wurden signifikant voneinander unterscheiden. Es werde ausschließlich die Sofortwerte untersucht, da die Maske nur während des Einsatzes/der Übung getragen wird. Der Maskentyp kann folglich nur zu diesem Zeitpunkt Auswirkungen haben. Der hier anzuwendende Test auf Lageunterschied ist wieder der Mann-Whitney U-Test. Es gilt die gleiche Hypothese bzw. die gleichen Bedingungen zum Verwerfen dieser Hypothese.

Für den Vergleich der Maskentypen Raucher Übung kann kein statistisch signifikanter Unterschied nachgewiesen werden. Für die Werte Raucher Real ist der Mann-Whitney-U-Test nicht durchführbar, da nur von einem Raucher mit einer Überdruckmaske ein Messwert für den Zeitpunkt „sofort“ vorliegt. Bei den Nichtrauchern kann nur im Realeinsatz ein statistisch signifikanter Unterschied angenommen werden (Übung $p=0,429$; Real $p=0,034$). Dazu auch Abbildung 43.

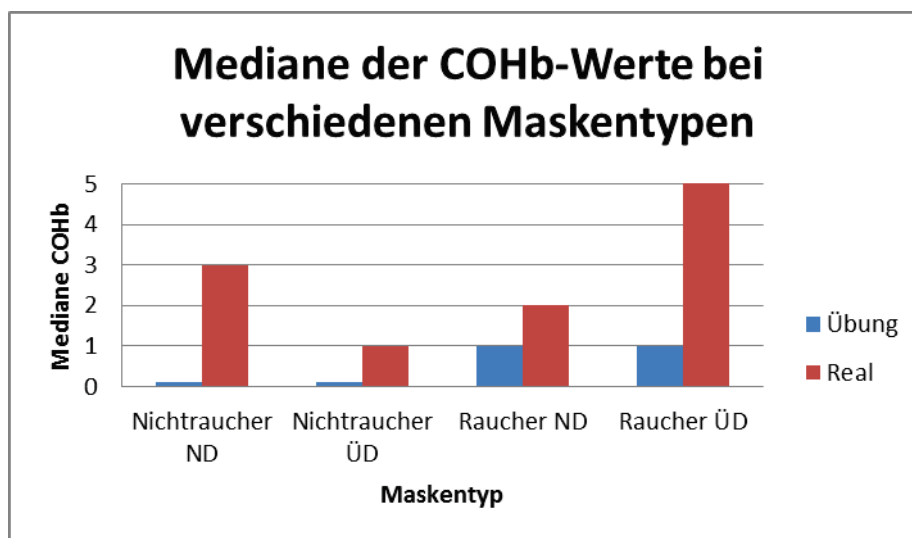


Abbildung 43: Mediane der COHb-Werte unterschiedlicher Maskentypen

5.5 Zusammenfassung der Ergebnisse

Im Übungseinsatz zeigen 5 von 56 Nichtrauchern (8,9%) und einer von 28 Rauchern (3,6%) erhöhte COHb-Werte. Insgesamt weisen damit 6 von 84 (7,1%) Teilnehmern des Übungsszenarios zu allen Messzeitpunkten erhöhte COHb-Werte auf. Im Realeinsatz trifft dies auf 9 von 49 Nichtrauchern (18,4%) und einen von 33 Rauchern (3%) zu. Insgesamt weisen im Realeinsatz 10 von 82 Probanden (12,2%) einen erhöhten COHb-Wert auf. Im Übungsszenario klagte ein Nichtraucher mit einem COHb von 9% über

Beschwerden. Im Realeinsatz gaben zwei Nichtraucher mit COHb-Werten von 6% bzw. 12% Beschwerden an.

In den Teilnehmergruppen Nichtraucher „sofort“ und „10-min“, sowie Raucher „sofort“ besteht ein signifikanter Unterschied der COHb-Werte zwischen Übung und Realeinsatz. In der Gruppe Raucher „10-min“ konnte kein signifikanter Unterschied zwischen Übung und Realeinsatz festgestellt werden.

Bei 20,2% der Teilnehmer (Raucher und Nichtraucher) im Übungsszenario zeigt der zeitliche Verlauf der COHb-Werte eine v-förmige Charakteristik. Bei 36,6% der Probanden des Realeinsatzes (Raucher und Nichtraucher) kamen es zu einem zeitlich ansteigenden Verlauf des COHb-Wertes zwischen den Messungen. Des Weiteren konnten im Übungseinsatz bei jeweils zehn Nichtrauchern und neun Rauchern (19 von 84 entspricht 22,6%) Anstiege um 3-6% COHb und bei drei Nichtrauchern und drei Rauchern ein Anstieg $\geq 6\%$ (sechs von 84 entspricht 7%) zwischen den Messungen beobachtet werden. Im Realeinsatz waren bei zwei Nichtrauchern und zwei Rauchern Anstiege zwischen 3-6% vom individuellen Ausgangswert zum jeweiligen Endwert zu verzeichnen, wobei auch die Endwerte unterhalb der hier definierten Schwelle für einen absolut erhöhten COHb-Wert blieben (4 von 82 entspricht 5%). Keiner dieser Teilnehmer hat zwischen den Messungen geraucht.

Die Maskendichtprobe wird im Übungsszenario von 98% der Teilnehmer und im Realeinsatz von 91% durchgeführt. Das Lüften der Einsatzkleidung führten nach der Übung 94,5% und nach dem Realeinsatz 15% der Einsatzkräfte durch. 23,8% der Übungsteilnehmer und 15% der Realeinsatzkräfte wiesen Herzfrequenzen über ihrer persönlichen Dauerleistungsgrenze auf. Im Übungsszenario hatten 30% Pulsfrequenzen über 150bpm direkt nach der Übung.

6 Diskussion

6.1 Limitationen

6.1.1 Methodische Diskussion

Für die vorliegende Untersuchung wurde als Studiendesign eine Beobachtungsstudie ausgewählt, da jede Form von Interventionsstudie, in der man einigen Teilnehmern vorgeschriebene Sicherheitsmaßnahmen vorenthält, ethisch und rechtlich nicht vertretbar ist. Daraus resultiert auch, dass im Folgenden keine Aussage über tatsächliche kausale Zusammenhänge getroffen werden kann. Die hier aufgezeigten Hinweise auf mögliche Zusammenhänge ergeben sich aus der Häufigkeit ihrer Beobachtung.

Die im Fragebogen aufgeführten Maßnahmen zur Überprüfung der Ausrüstung und zur Gewährleistung der eigenen Sicherheit sind Bestandteil der Ausbildung zum Atemschutzgeräteträger. Es sollte jedem Teilnehmer bekannt sein, wie und zu welchem Zeitpunkt sie durchzuführen sind. Da die Fragebögen eigenhändig und unbeaufsichtigt ausgefüllt wurden, ist eine Verzerrung durch die Tendenz zur sozialen Erwünschtheit nicht auszuschließen. In diesem Fall würde die Häufigkeit der durchgeführten Maßnahmen überschätzt.

Die Frage neun des Fragebogens, ob vor einer der Messungen geraucht wurde, ist missverständlich gestellt und führte häufig zu Rückfragen durch die Teilnehmer. Da nicht sichergestellt ist, dass jede dazu entstandene Frage auch beantwortet werden konnte, werden in der Auswertung nur die erhöhten COHb-Werte von Teilnehmern berücksichtigt, die angaben, im Rahmen der Untersuchung gar nicht geraucht zu haben. Dadurch verringert sich sowohl in der Übung, als auch im Realeinsatz die Anzahl der ausgewerteten COHb-Werte erheblich. Im Übungsszenario können die COHb-Werte von 18 Teilnehmern (64%) verwendet werden, im Realeinsatz sind es Werte von 21 Teilnehmern (58%). Durch geringere Fallzahlen verringert sich die Power der Studie und ein möglicherweise vorhandener signifikanter Unterschied könnte bei den Rauchern eventuell auch aus diesem Grunde nicht nachgewiesen werden.

Ein weiterer Einflussfaktor, der die Aussagekraft der erhobenen Werte beeinflussen kann, ist die Reproduzierbarkeit der erhobenen Messwerte hinsichtlich wiederholter Messungen und unterschiedlicher Finger, an denen die Messungen durchgeführt worden sind. Bezüglich der zeitlichen Reproduzierbarkeit haben Zaouter et al. [107] COHb-

Wert Messungen an zwei aufeinanderfolgenden Tagen durchgeführt. Dabei wurden die pulsoxymetrisch gemessenen Werte mit den Werten einer spektrophotometrischen Untersuchung abgeglichen. Es zeigte sich, dass das auch in der vorliegenden Studie verwendete Pulsoxymeter RAD 57 kohärente und reproduzierbare Tag-zu-Tag Messungen liefert [107]. Auch Touger et al. [94] konnten durch wiederholte Messungen keinen verfälschenden Effekt feststellen.

Laut Benutzermanual des Herstellers ist die pulsoxymetrische Messung mittels RAD 57 an den Ring-oder Mittelfingern, außerdem an den Zeigefingern durchzuführen um genauest mögliche Ergebnisse zu generieren [63]. Diese Maßgabe wurde vor Durchführung der Untersuchung an alle durchführenden Untersucher gemeinsam mit der Bedienungsanleitung weitergegeben um auch in dieser Studie reliable SpCO-Werte zu erhalten. Es wurde außerdem darauf geachtet, alle Messungen möglichst am gleichen Finger durchzuführen. Touger et al, Barker et al. und Zaouter et al. [8, 94, 107] führten in Studien zur Vergleichbarkeit pulsoxymetrischer und spektrophotometrischer gleichzeitige und wiederholte Messungen sowohl an Zeige-, Mittel-, und Ringfinger durch, ohne dass die Fingerposition eine Messwertverfälschung ergeben hat. Eine relevante Beeinflussung der vorliegenden Messwerte durch unterschiedliche Fingerpositionen ist somit nicht vollständig auszuschließen, darf aber als unwahrscheinlich gelten.

Eine weitere mögliche Fehlerquelle für verfälschte COHb-Werte dieser Studie mag in der Verwendung von vier verschiedenen RAD 57 Geräten liegen. Alle hier verwendeten Geräte kamen direkt vom Hersteller. Durch diesen erfolgte eine Normung und Eichung der einzelnen Geräte [63]. Das Gerät ist von der US-amerikanischen Food and Drug Administration (FDA) ohne zusätzliche erforderliche Standardisierung für die klinische Anwendung zugelassen [63]. Auch Touger et al. [94] und Weaver et al. [100] führten ihre jeweiligen Untersuchungen mit drei, bzw. vier verschiedenen CO-Pulsoxymetern durch, ohne nennenswerte Messwertabweichungen zwischen den vorhandenen Geräten zu bemerken. Coulange et al. [20] stellten in ihrer Studie zur Vergleichbarkeit pulsoxymetrischer und spektrophotometrischer Messungen fest, dass eine zusätzliche Kalibrierung durch den Untersucher auch zwischen wiederholten Messungen nicht erforderlich ist.

Bei der Auswertung pulsoxymetrischer Messungen werden viele mögliche Einflussfaktoren diskutiert. Riemann et al. [73] beschreiben unter anderem eine

Beeinflussung durch periphere Vasokonstriktion, Hypovolämie, erniedrigtes Herzzeitvolumen und durch Hypothermie. Diese Studie wurde an gesunden Feuerwehrangehörigen durchgeführt, die im Rahmen des Einsatzgeschehens oder der Übung teils schwere körperliche Arbeit verrichten mussten. Darunter sind ein Anstieg des arteriellen Blutdrucks, der Pulsfrequenz und auch der peripheren Durchblutung zu erwarten. Oben genannte Einflussfaktoren werden daher als relevante Fehlerquelle für die vorliegende Studie ausgeschlossen. Weitere Einflussfaktoren, die von Coulange et al. [20] beobachtet wurden sind künstliche Fingernägel, eine Methämoglobinämie und eine Sichelzellanämie. Eine Methämoglobinämie wurde bei keinem der hier untersuchten Teilnehmer nachgewiesen. Das Vorliegen einer Sichelzellanämie ist bei keinem der untersuchten Probanden bekannt. Das Tragen künstlicher Fingernägel im Atemschutzeinsatz ist ebenso wie das Tragen jeglichen Körperschmucks durch den Barterlass in der Feuerwehrdienstvorschrift 7 [34] untersagt. Somit ist auch dieser Einflussfaktor in der vorliegenden Untersuchung vernachlässigbar. Ein Einfluss durch eine Änderung der Körperkerntemperatur wird von Touger et al. und Roth et al. kontrovers diskutiert [75, 94], jedoch nicht sicher nachgewiesen. In den vorliegenden Untersuchungsszenarien ist durch die Wärmebelastung am Einsatzort und die körperliche Arbeit unter persönlicher Schutzausrüstung mit einem Anstieg der kapillären Durchblutung und der Fingertemperatur, sowie der Atemfrequenz zu rechnen. Diese haben laut Studien von Weaver et al. [100] und Roth et al. [75] jedoch keinen Einfluss auf die pulsoxymetrische COHb-Wert Bestimmung durch die verwendeten Pulsoxymeter vom Typ RAD 57.

Ein weiterer Einflussfaktor für eine pulsoxymetrische Messung scheint die Hautfarbe eines Probanden zu sein [94]. Massive Verunreinigungen der Hände können möglicherweise ebenfalls eine Verfälschung des pulsoxymetrisch gemessenen COHb-Wertes zur Folge haben. Aus diesem Grund wurde in der vorliegenden Studie darauf geachtet, dass die vorgenommenen Messungen bei möglichst sauberen Händen durchgeführt wurden. Eine Handwaschgelegenheit war gerade im Realeinsatz nicht überall vorhanden, so dass geringe Verunreinigungen der Hände nicht sicher auszuschließen sind. Grobe Verschmutzungen waren durch das Tragen feuerfester und wasserdichter Handschuhe in Übung und Realeinsatz jedoch nicht zu beobachten. Alle pulsoxymetrischen Messungen dieser Studie wurden von medizinischem Fachpersonal durchgeführt. Sie wurden vor Beginn der Untersuchungen auf die besonderen Anforderungen der Bedienung der verwendeten Messgeräte hingewiesen. Des Weiteren

ist davon auszugehen, dass allen Untersuchern die Anforderungen und möglichen Einflussfaktoren einer pulsoxymetrischen Messung aus dem klinischen Alltag vertraut sind.

Im Rahmen der teils starken körperlichen Belastung in Übung und Realeinsatz ist eine Hyperventilation einiger Teilnehmer anzunehmen. Dadurch kann es zu einem O₂Hb-Anstieg kommen. Da die Absorptionsmaxima von COHb und O₂Hb sehr eng beieinander liegen, der Hersteller aber keine genauen Wellenlängen zur differentiellen Bestimmung dieser angegeben hat, ist ein Überschätzen des COHb-Wertes bei der pulsoxymetrischen Messung nicht sicher auszuschließen. Da der Hersteller jedoch gleichzeitig angibt, den CO-Gehalt auch durch Wellenlängen im Infrarotbereich zu bestimmen [63] und es dort Wellenlängen gibt, die hoch spezifisch von COHb absorbiert werden [104], wird eine relevante Verfälschung der Messwerte durch Interferenz hier als unwahrscheinlich erachtet.

Durch das Ablegen der Atemschutzmaske und teils unübersichtliche Einsatzsituationen kann es im Realeinsatz in einigen Fällen zu Verzögerungen von wenigen Minuten vor der ersten Messung gekommen sein. Daraus entstehende Verzerrungen können ein Unterschätzen der erhobenen Parameter bedingen. Die Messung des COHb-Anteils ist bei einer COHb-Halbwertszeit von einer Stunde eher nicht betroffen, wohl aber die Herzfrequenz, die dadurch unterschätzt werden kann.

Die vom Hersteller angegebene Messungenauigkeit des Pulsoxymeters von $\pm 3\%$ (1 SD) bei COHb-Werten zwischen 0 und 40% COHb wird von mehreren vergleichenden Studien bestätigt und teilweise auch unterschritten [8, 58, 75, 94, 100, 107]. Dabei wird die Verwendbarkeit für die jeweilig untersuchte klinische Fragestellung kontrovers diskutiert, da internationale Standardanforderungen an CO-Pulsoxymeter noch nicht existieren [75]. Barker et al. [8] und Roth et al. [75] stützen eine vermehrte klinische Anwendung des Masimo CO-Pulsoxymeter in dem sie darauf verweisen, dass die gegebene Abweichung innerhalb der Grenzen der internationalen Anforderungen an herkömmliche, ubiquitär verwendete O₂-Pulsoxymeter liege. Für die Beantwortung der hier untersuchten Forschungsfragen sind die Grenzen der verwendeten Geräte ausreichend. Um eine falsch positive Einschätzung der Häufigkeit erhöhter COHb-Werte bei Atemschutzgeräteträgern zu vermeiden, wurden in dieser Studie Messwerte erst dann als erhöht definiert, wenn sie eine Standardabweichung über dem in der Literatur angegebenen oberen Normwert lagen. Im Umkehrschluss ist es deshalb

möglich, dass es zu einem Unterschätzen der Anzahl erhöhter Messwerte gekommen ist. Möglicherweise wurden gering erhöhte Werte nicht immer auch als solche erkannt [62].

Im Vergleich der COHb-Werte in den verschiedenen Einsatzszenarien spielt die angegebene Messungenauigkeit vor allem bei der Betrachtung kleiner Teilnehmergruppen eine Rolle. Je größer die erfasste Teilnehmerzahl (n), desto eher mittelt sich eine Messungenauigkeit bei Ermittlung der Mittelwerte heraus.

Die statistische Größe, die dies beschreibt ist der Standardfehler, definiert als SD/\sqrt{n} [76]. Mit zunehmender Stichprobengröße ist der Standardfehler für die Diskussion vernachlässigbar gering. Im Fall der vorliegenden Studie bedeutet dies, dass die Aussagekraft der Untersuchungen bei den Nichtrauchern ($n=56$ und $n=49$) über der statistischen Power der vergleichenden Untersuchungen bei den eingeschlossenen Rauchern liegt. Um eine vergleichbare statistische Power zu erlangen, müsste eine weitere Untersuchung mit größerer Teilnehmerzahl in der Gruppe der Raucher durchgeführt werden.

6.2 Demographische Daten

In der vorliegenden Studie wurden zur Untersuchung der postexpositionellen CO-Belastung von Atemschutzgeräteträgern deren COHb-Werte sowohl in einem Übungsszenario, als auch bei realen Brandeinsätzen gemessen. Eine außerordentlich hohe CO-Belastung konnte bei keinem der teilnehmenden Einsatzkräfte nachgewiesen werden; mäßig erhöhte COHb-Werte jedoch in einigen Fällen. Des Weiteren wurden signifikante Unterschiede des COHb-Gehaltes zwischen Übung und Realeinsatz nachgewiesen und gezeigt, dass unterschiedliche Ausrüstung den COHb-Gehalt in einigen Fällen beeinflussen kann.

In der vorliegenden Studie wurden Messdaten von 84 Feuerwehreinsatzkräften im Übungseinsatz und 82 im Realeinsatz beschrieben. Der Anteil weiblicher Atemschutzgeräteträger beider Gruppen betrug dabei 6,6%. Damit ist er etwas geringer als der Anteil aller weiblichen Feuerwehreinsatzkräfte im Deutschen Feuerwehrverband. Dieser wird vom DFV mit 10,2% angegeben. Das Durchschnittsalter der Teilnehmer dieser Studie lag bei 28,9, beziehungsweise 29,6 Jahren und damit etwas über dem durchschnittlichen Alter (24,9 Jahre) der freiwilligen Feuerwehreinsatzkräfte einer vergleichbaren Studie von Finteis et al. [28], die im Jahr 2002 eine Untersuchung zur akuten physischen Belastung von Atemschutzgeräteträgern

bei der Übung im Brandhaus unter Einwirkung von Hitze während des Tragens der Schutzkleidung durchführte [28, 83].

Der Anteil der Raucher unter den teilnehmenden Feuerwehr-Einsatzkräften liegt mit 33,3% beziehungsweise 40,2 %, über dem Anteil der Raucher an der Gesamtbevölkerung. Dieser wird von der Deutschen Krebsgesellschaft für das Jahr 2010 mit ca. 25% angegeben [24]. Das durchschnittliche Körpergewicht betrug 85,7kg beziehungsweise 81,4kg, wobei die Einsatzkräfte im Realeinsatz im Durchschnitt leichter waren. Damit lagen die Teilnehmer dieser Studie etwa in dem Bereich (82,4kg), den auch Finteis et al. [28] erhoben.

Angaben über die Häufigkeit des Einsatzes von Überdruck- beziehungsweise Normaldruckgeräten ließen sich in der Literatur nicht finden.

Ihre Einsatzerfahrung beschrieben die Teilnehmer der Übungsgruppe zu 44% mit „wenig erfahren“, zu 36% mit „erfahren“ und zu 13% mit „sehr erfahren“. 7% machten keine Angabe bezüglich ihrer Einsatzerfahrung. Dies entspricht in etwa der Verteilung, die auch von den Probanden der Finteis Studie angegeben wurde [28].

Im Untersuchungsaufbau von Finteis et al. [28] simulierten die teilnehmenden Einsatzkräfte, ähnlich dem Übungsszenarios der vorliegenden Studie, einen Löschangriff im Brandhaus der Landesfeuerwehrschule Baden-Württemberg. Dabei waren sie im Durchschnitt etwas kürzer (21 min) im Einsatz als die Kräfte dieser Untersuchung (22 bzw. 25 Minuten).

6.3 Messwerte

6.3.1 Erhöhte COHb-Werte und ihre Ursachen

Das Hauptanliegen der vorliegenden Beobachtungsstudie ist die Untersuchung der CO-Belastung von Atemschutzgeräteträgern in Form einer COHb-Wert-Bestimmung. In der Vergangenheit wurden sowohl in Deutschland als auch in Schweden Studien zur physischen Belastung von Atemschutzgeräteträgern in Brandübungsanlagen durchgeführt [28, 91]. Neben Finteis et al. [28] führte auch die technische Universität Lund unter der Leitung von Stefan Svensson im Jahr 2008 eine Untersuchung der gesundheitlichen Belastung von Ausbildern für Atemschutzgeräteträger in der Realbrandausbildung der schwedischen Rettungsschule in Revinge durch. Diese begleiten Atemschutzgeräteträger in Ausbildung bei deren Übungsdurchgängen in einer Wärmegewöhnungsanlage [91]. Beide Untersuchungen erhoben neben einem breiten

Spektrum anderer physiologischer Daten mittels einer Blutprobe am Rande auch die COHb-Werte der Teilnehmer. Dabei lag das Hauptaugenmerk bei Finteis et al. [28] auf der kardio-vaskulären, und bei Svensson et al. [91] auf der pulmonalen Belastung. Die hier vorliegende Untersuchung richtete den Fokus hingegen explizit auf die CO-Belastung der Einsatzkräfte und erfragte darüber hinaus auch Verhaltensweisen im Einsatz. Somit können hier neben der Feststellung einer Belastung auch deren mögliche Ursachen erörtert werden.

Da Svensson et al. [91] die Belastung von Ausbildern in einer Wärmegeöhnungsanlage untersuchten, liegen keine Daten aus dem Realeinsatz vor. Auch die Untersuchung von Finteis et al. [28] bezog sich ausschließlich auf das Übungsszenario im Brandhaus. In der vorliegenden Erhebung wurden jedoch zusätzlich Atemschutzgeräteträger im realen Brandeinsatz erfasst. Somit ist im Folgenden ein Vergleich der Messwerte und Verhaltensweisen möglich und die getroffenen Aussagen gelten nicht, wie bei oben genannten Studien, nur für den Übungsfall.

Im Übungsszenario konnten im Rahmen der vorliegenden Untersuchung bei 6 von 84 Teilnehmern (7%) (Werte von Rauchern und Nichtrauchern zusammengefasst) erhöhte COHb-Werte gemessen werden. Die als erhöht gemessenen Werte der Nichtraucher betrugen 6%, 7%, 9% und 18%. Nur der Teilnehmer, dessen Wert auf 9% erhöht war, klagte über Beschwerden. Im Realeinsatz wurden bei 10 von 82 Probanden (12,3%) (Raucher und Nichtraucher) erhöhte COHb-Werte gemessen. Die Werte betrugen 6%, 7%, 10%, 11%, 12% und 15% COHb. Im Realeinsatz gaben zwei Nichtraucher mit COHb-Werten von 6% bzw. 12% Beschwerden an. Insgesamt zeigt diese Studie, dass selbst beginnende CO-Intoxikationen subjektiv selten wahrgenommen werden.

Des Weiteren konnten im Übungseinsatz bei 29,6% und im Realeinsatz bei 5% der Probanden Anstiege von mehr als 3% COHb zwischen den Vorher- und Sofort-Messwerten beziehungsweise den Sofort- und den 10 min-Werten gemessen werden. Nur einer dieser Probanden wies einen als erhöht definierten Messwert auf. Alle weiteren COHb-Werte dieser Probanden lagen, trotz des Anstiegs $\geq 3\%$ im Normalbereich. Keiner dieser Teilnehmer hat zwischen den Messungen geraucht, ein Anstieg aus diesem Grund ist somit auszuschließen. Da diese Anstiege teilweise das Doppelte der vom Hersteller angegebenen Standardabweichung betragen, besteht auch hier die Möglichkeit, dass die Teilnehmer zwischenzeitig vermehrt CO eingeatmet haben.

In der Beobachtung erhöhter COHb-Werte bei Feuerwehreinsatzkräften ergänzt die vorliegende Arbeit bestehende Untersuchungen. Auch Svensson et al. [91], Finteis et al. [28], Loke et al. [59], Sheppard et al. [85] und Stewart et al. [90] konnten in den letzten Jahren erhöhte COHb-Anteile insbesondere bei Atemschutzgeräteträgern nach Übung und Realeinsatz nachweisen. Ähnlich den vorliegenden Ergebnissen des Übungsszenarios registrierten sowohl Finteis et al. [28] als auch Svensson et al. [91] signifikante COHb-Anstiege nach Übungsdurchgängen in Brandsimulationscontainern.

Ein ähnlicher Vergleich der erhobenen Realeinsatzdaten lässt sich nur schwerlich anstellen, da gezielte Untersuchungen zur Belastung im Realeinsatz nur in sehr geringem Ausmaß zu finden waren, beziehungsweise in dieser Art gar nicht durchgeführt wurden. Eine Studie der Feuerwehr Wiesbaden untersuchte wie oft Feuerwehreinsatzkräfte und auch Rettungsdienst im Realeinsatz mit CO konfrontiert wurden. Dabei wurden nicht ausschließlich Brandeinsätze betrachtet. Im Zeitraum August 2011 bis Juni 2012 wurden rund 64 Einsätze abgearbeitet in denen ein gesundheitsgefährdender CO-Gehalt der Umgebungsluft mittels eines Prüfgeräts gemessen werden konnte, ohne dass zuvor von einer CO-Gefährdung ausgegangen wurde. Angesichts der unerwartet hohen Gefahr stattet die Feuerwehr Wiesbaden heute alle Einsatzkräfte mit CO-Warngeräten aus [69].

Im Folgenden einige Studien, in deren Rahmen COHb im Realeinsatz mittels Blutproben miterfasst wurde. Loke et al. [59] maßen sieben Feuerwehreinsatzkräfte, die nach einem Brandeinsatz COHb-Werte zwischen 3% und 8% aufwiesen, sowie einen weiteren Feuerwehrmann, der eine Rauchgasintoxikation mit COHb-Werten über 42% erlitt, nachdem sein Atemluftvorrat aufgebraucht und er den Brandgasen ungeschützt ausgesetzt war. Weitere Erhebungen von COHb-Werten nach einem Realeinsatz wurden von Sheppard et al. [85] im Jahr 1986 im Zusammenhang mit einer Untersuchung der Lungenfunktion von Berufsfeuerwehrmännern vorgenommen. Hierbei wurden am Ende einer Schicht COHb-Werte von 17% bis 22% gemessen. Stewart et al. [90] untersuchten Feuerwehrmänner nach einer 24 Stunden Schicht. Dabei ergaben sich für die nichtrauchenden Feuerwehrleute COHb-Werte zwischen 1,4% und 9,1% und bei den Rauchern Werte zwischen 3% und 13%.

Es gibt verschiedene Mechanismen, die als Ursache eines Anstiegs des COHb-Gehaltes im Atemschutzeinsatz in Frage kommen.

Eine Möglichkeit ist die Entstehung von endogenem COHb durch eine vermehrte Häm- und Myolyse bei körperlicher Belastung. Dies ist auch für die vorliegende Studie nicht sicher auszuschließen. Es wird jedoch als unwahrscheinlich erachtet, da Finteis et al. [28] bei einem vergleichbaren Versuchsaufbau sowohl eine vermehrte Hämolyse, als auch die Myolyse ausschließen konnten.

Eine weitere mögliche Ursache wäre eine Verunreinigung der mitgeführten Atemluft mit CO. Da die Atemluft zum Befüllen der Pressluftflaschen aus der Umgebungsluft gewonnen wird, können in der Umgebungsluft enthaltene Schadstoffe in die Flasche gelangen, diese kontaminieren und so auch in die Atemwege der Einsatzkraft gelangen. Einige Fälle von CO-Intoxikationen durch kontaminierte Atemluft sind in der Literatur beschrieben [21, 28]. Diese Kontaminationsmöglichkeit ist im vorliegenden Versuchsaufbau sehr unwahrscheinlich. Da sich die meisten Anstiege des COHbs nicht unmittelbar nach dem Tragen des Pressluftatmers, sondern 10 min später ereignen und die Pressluftflaschen dieser Studie in unterschiedlichen Atemschutzwerkstätten befüllt wurden, wird die Wahrscheinlichkeit einer Kontamination auf diesem Wege als gering erachtet.

Als Hauptquelle der CO-Belastung dieser Studie wird das Einatmen des COs aus dem Brandrauch betrachtet. Dazu kann es während des Einsatzes bei Maskenundichtigkeiten, oder nach dem Einsatz durch ungeschützte Atemwege kommen. Die Maskenundichtigkeit kann bereits vor dem Einsatz bestehen und aufgrund fehlender Sicherheitsmaßnahmen nicht entdeckt worden sein, oder während des Einsatzes durch Anstoßen oder Verrutschen in unwegsamem Einsatzgebiet entstehen. Die Sicherheitsmaßnahmen zum Beheben einer Undichtigkeit bestehen unter anderem in der Durchführung der Maskendichtprobe. Dabei ist es wichtig, diese Probe erst nach dem Aufsetzen von Flammenschutzhaube und Helm durchzuführen, da es ansonsten zu einem nachträglichen Verrutschen und somit zu einer Maskenundichtigkeit kommen kann. Sowohl Svensson et al. [91] als auch Finteis et al [28] stellten fest, dass Fehlbedienungen der Schutzausrüstung im Realeinsatz zu gefährlichen COHb-Anstiegen führen können. Im Rahmen des Übungsszenarios führten die Teilnehmer die Maskendichtprobe, laut eigener Angaben, zu 98,8% durch. In 76,3% erfolgte dies nach dem Aufsetzen der Flammenschutzhaube. Im Realeinsatz führten 90,2% der Einsatzkräfte die Maskendichtprobe durch, wobei dies bei 84,1% nach dem Aufsetzen der Flammenschutzhaube erfolgte. Als Gründe für das Nichtdurchführen der Sicherheitsmaßnahmen lassen sich Stress, Aufregung, Zeitmangel, mangelndes Wissen

und unter Umständen auch die Witterung vermuten. Dies gilt sowohl für die Übung, als auch Realeinsätze.

In dieser Untersuchung kam es nicht nur im Brandsimulationscontainer, sondern auch danach zur erhöhten COHb-Werten bei einigen Teilnehmern. Auch dies kann verschiedene Ursachen haben. Einerseits kann es zum Einatmen von Brandrauch durch aus der Kleidung ausgasende Brandgase zu einem Anstieg des COHb kommen. Deshalb soll die Kleidung unbedingt vor dem Absetzen der Maske gelüftet werden. Andererseits kann allein der Aufenthalt in der Nähe der Rauchgrenze ohne Schutzausrüstung nach dem Einsatz zu einem erheblichen Einatmen von Brandgasen führen. 94% der Einsatzkräfte lüfteten ihre Einsatzkleidung nach der Übung kurz aus bevor sie das Atemschutzgerät absetzten. Im Realeinsatz gaben nur 15,9% an, diese Sicherheitsmaßnahme getroffen zu haben. Bei nicht gelüfteter Einsatzkleidung verbleibt ein Reservoir an CO in und unter der Kleidung. Theoretisch wäre ein verzögerter Anstieg des COHb-Wertes nach dem Einsatz nicht nur durch Einatmen des ausgasenden COs möglich, sondern auch durch eine Aufnahme über die Haut denkbar. Die Diffusion von CO über die intakte Haut in den Körper konnte jedoch bisher nicht dargestellt werden und wird in vorausgegangenen Untersuchungen als vernachlässigbar betrachtet. [65, 71]

Viele reale Brandeinsätze fallen in die Nachtstunden. Um bei kühlen Temperaturen nach einer starken körperlichen Belastung nicht auszukühlen, öffnen viele Einsatzkräfte ihre kontaminierte Einsatzkleidung nicht. Gerade das Ablegen der Kleidung wird häufig vermieden, da nur in seltenen Fällen saubere Ersatzkleidung am Einsatzort verfügbar ist.

Diejenigen, bei denen im Rahmen dieser Übung erhöhte COHb-Werte gemessen wurden, führten in allen Fällen die Maskendichtprobe zum richtigen Zeitpunkt durch. 60% lüfteten auch die Einsatzkleidung. Unter denjenigen, die im Realeinsatz mit erhöhten Werten auffielen, führten acht von zwölf die Maskendichtprobe zum richtigen Zeitpunkt und einer vor dem Aufsetzen der Flammschutzhaube durch. Das Lüften der Jacke wurde von vier Teilnehmern durchgeführt und von fünf nicht. Die weiteren Teilnehmer machten bezüglich ihres Verhaltens im Einsatz keine Angaben. Ein ursächlicher Zusammenhang zwischen erhöhten COHb-Werten und Sicherheitsverhalten lässt sich aufgrund des Studiendesigns nicht herleiten. Das

insgesamt geringer ausgeprägte Sicherheitsverhalten im Realeinsatz legt jedoch eine Beziehung zur Anzahl der erhöhten COHb-Werte nahe.

In der hier vorliegenden Untersuchung nimmt der COHb-Gehalt sowohl bei den Messwerten aller Teilnehmer des Übungsszenarios, als auch bei vielen Einzelwerten der Probanden im Übungseinsatz, zwischen den ersten beiden Messungen signifikant ab, um bei der dritten Messung erneut signifikant anzusteigen. Solch ein v-förmiger Verlauf der Messwerte (siehe Abbildung 23) ist bei sieben Rauchern und zehn Nichtraucher zu beobachten (20,2%). Es gibt mehrere mögliche Erklärungen für sinkende COHb-Werte zwischen der ersten und der zweiten Messung. Zunächst zeigten Beobachtungen während der Erhebung der Übungsdaten, dass kleinere Gruppen, deren Einsatz noch bevor stand, sich oft in der näheren Umgebung der rauchenden Brandübungsanlage aufhielten um das Geschehen schon einmal in Augenschein nehmen zu können. Aus den dabei eingeatmeten Brandgasen könnte eine initiale Erhöhung des COHbs (Messung des Vorher-Wertes) resultieren. Beim Durchschreiten der Anlage wurde für im Mittel 22 Minuten „saubere“ Atemluft aus der Pressluftflasche eingeatmet. Bei gleichzeitiger starker körperlicher Arbeit ist von einer Hyperventilation auszugehen. Diese könnte eine beschleunigte Elimination des COHb zur Folge haben. Bei einigen Atemschutzgeräteträgern könnte die Elimination des COHbs zusätzlich durch die leichte Überdruckbeatmung in der Überdruckmaske verstärkt werden. Im Anschluss an die eigene Übung hielten sich viele Einsatzkräfte wiederum im Nahbereich der Anlage auf, um das weitere Geschehen zu betrachten. Ein Resultat dieses Aufenthalts könnte, ähnlich wie ausgasendes CO aus der Einsatzkleidung, ein erneuter Anstieg des COHb sein. Gemeinsam können diese Faktoren eine mögliche Erklärung für die häufigen v-förmigen Verläufe sein. Bei den häufig eher kleinen erhobenen Messwerten unter 6% dieser Studie bewegen sich viele Probanden im Rahmen der Messungenauigkeit des Pulsoxymeters von $\pm 3\%$ [20, 63, 100]. Der tatsächliche Verlauf der Wertekurve ist deshalb gerade für Messwerte $\leq 3\%$ nicht sicher zu belegen. Gleiches gilt auch für die Werteanstiege zwischen 3-6% in Rahmen des Realeinsatzes. Es ist möglich, dass der häufig gesehene v-förmige Verlauf in Teilen ein Effekt der Messungenauigkeit des Pulsoxymeters ist. Um zu überprüfen, ob der Werteverlauf tatsächlich, so wie hier gesehen in nahezu einem Viertel der Fälle v-förmig ist, müsste eine folgende Studie im Rahmen eines Übungsszenarios COHb-Werte mittels Photospektrometrie oder Gaschromatographie bestimmen und vergleichen.

6.3.2 Unterschiede zwischen Übung und Realeinsatz

Betrachtet man die COHb-Messwerte und vergleicht Übung und Realeinsatz, so fallen zwischen beiden Szenarien Unterschiede von teilweise über einem Prozent auf. Aus diesem Grund wurde überprüft, ob diese Unterschiede signifikant sind. Es konnte gezeigt werden, dass die COHb-Werte im Realeinsatz in drei Gruppen statistisch signifikant über denen der Werte nach der Übung liegen. Hier haben sowohl Raucher, als auch Nichtraucher unmittelbar nach einem Realeinsatz im Mittel höhere COHb-Werte, als ihre Kollegen nach der Übung. Trotz ähnlicher Ausbildung und gleichermaßen vorgegebenen Sicherheitsmaßnahmen kommt es im Realeinsatz zu einer höheren CO-Belastung der Einsatzkraft.

Zum Messzeitpunkt „10-min“ konnten bei den Rauchern in dieser Studie keine signifikanten Unterschiede zwischen Übung und Realeinsatz nachgewiesen werden. Dies kann einerseits an der geringeren Fallzahl und der damit herabgesetzten Power der Studie liegen. Andererseits zeigen die erhobenen Daten, dass Rauchen einen erheblichen Störfaktor bei der Untersuchung der CO-Belastung des Atemschutzgeräteträgers darstellt. So liegen die hier erhobenen Mediane und Perzentilen unter Einschluss der tatsächlichen Raucher zu fast allen Messzeitpunkten einen Prozentpunkt über den Medianen der Raucher, die im Rahmen der Studie nicht geraucht haben. So ist möglicherweise selbst bei gleichbleibender Fallzahl aufgrund des Störfaktors Rauchen kein höheres Signifikanzniveau zu erwarten. Da eine Quantifizierung des Störfaktors schwierig erscheint, sollten nachfolgende Studien zur Untersuchung der CO-Belastung von Feuerwehreinsatzkräften möglicherweise eine Untersuchung allein an Nichtrauchern in Betracht ziehen. Die hier gemessenen Unterschiede zwischen Rauchern, die während des Einsatzes nicht geraucht haben und denen die rauchten zeigen, dass Rauchen am Einsatzort eine zusätzliche CO-Belastung bedeutet. Eine solche sollte an einem Ort mit potentiell erhöhter Intoxikationsgefahr durch Brandrauch möglichst unterlassen werden, da bereits die gering erhöhte CO-Aufnahme langfristig Folgeschäden haben kann [9, 89, 91].

Obwohl eine Aussage über die ursächlichen Zusammenhänge im Rahmen dieses Studiendesigns nicht möglich ist, lässt sich durch das gleichzeitige Beobachten weniger gut durchgeführter Sicherheitschecks im Realeinsatz eine mögliche Ursache sehen. Das häufigere Auftreten erhöhter COHb-Werte im Realeinsatz lässt vermuten, dass das seltenere Durchführen von Maskendichtprobe und Lüften der Einsatzkleidung im

Realeinsatz dafür verantwortlich sein könnten. Ein weiterer Erklärungsansatz kann eine mögliche höhere CO-Belastung im Realeinsatz sein, die durch das Aufhalten an der Einsatzstelle ohne Atemschutzgerät entsteht. Gründe hierfür mögen persönliches Interesse, aber auch eine Einsatzstelle, die keine ausreichende räumliche Entfernung zum Feuer zulässt, infrage kommen.

6.3.3 Unterschiede zwischen Maskentypen

Ein häufig angeführtes Argument der Befürworter von Überdruckmasken liegt im höheren Schutz des Geräteträgers vor eindringenden Brandgasen bei Maskenundichtigkeiten [4]. In der Literatur ließ sich zum jetzigen Zeitpunkt keine Studie finden, die diese Aussagen belegen konnte. Deshalb wurde in dieser Studie ein Vergleich bezüglich eines möglichen Unterschiedes der COHb Anteile gezogen. Im Übungseinsatz kam es bei einem von 58 Normaldruckgeräteträgern (1,7%) und bei einem von 25 Überdruckgeräteträgern (4%) zu erhöhten COHb-Konzentrationen. Im Realeinsatz wurden bei 5 von 56 Normaldruckgeräteträgern (8,9%) erhöhte Werte festgestellt. Keiner der Überdruckgeräteträger zeigte auffällige Werte. Aus der deskriptiven Beobachtung lässt sich somit nur für den Realeinsatz ein möglicher Effekt des Überdrucksystems vermuten. Ein statistischer Vergleich der Messwerte erbrachte widersprüchliche Ergebnisse. So konnten im Übungseinsatz signifikant niedrigere Messwerte für das Tragen von Normaldruckmasken erhoben werden. Im Realeinsatz hingegen zeigte sich dieser Benefit für die Träger von Überdruckmasken. Insgesamt muss man davon ausgehen, dass die Fallzahlen für diese Untersuchung deutlich zu niedrig waren. Ausreißerwerte hatten einen zu hohen verfälschenden Eindruck auf die statistische Berechnung, weshalb diese Werte im Folgenden nicht weiter betrachtet werden. Um eine Klärung des tatsächlichen Einflusses des Maskentyps auf die CO-Belastung der Einsatzkräfte zu erreichen empfiehlt sich nachfolgend eine Studie, die sich explizit mit dieser Fragestellung auseinandersetzt.

6.3.4 Kardiovaskuläre Parameter

Neben den COHb-Anteilen wurden durch das Pulsoxymeter weitere Parameter erfasst. Darunter befand sich auch die Herzfrequenz der Teilnehmer. Die durchschnittliche Herzfrequenz betrug in der Übungsgruppe direkt nach der Übung 128 bpm. In der Realeinsatzgruppe wurde die mittlere Herzfrequenz zu beiden Messzeitpunkten mitbestimmt. Sie betrug direkt nach dem Einsatz 121bpm und sank nach 10 Minuten auf 109 bpm. Mögliche Ursachen der hohen Pulsfrequenzen sind fehlendes Fitnesstraining

und mangelnde Erfahrung im Innenangriff. Mangelnde Erfahrung erhöht den Stressfaktor vor und während einer Übung und kann einen Anstieg der Herzfrequenz auf über 150bpm verursachen [28, 83]. Finteis et al. [28] verglichen in zwei unterschiedlichen Gruppen Freiwillige Feuerwehrmänner und Berufsfeuerwehrmänner. Bei den als „gut trainiert“ beschriebenen Berufsfeuerwehrmännern sank die durchschnittliche Herzfrequenz bereits nach 10 Minuten auf oberes Ruhepulsniveau. Die langsamere Erholung der freiwilligen Kräfte wurde ausschließlich als Ausdruck mangelnder körperlicher Fitness gewertet [28]. Da die durchschnittlichen Frequenzen der vorliegenden Studie etwa im Bereich der Frequenzen der freiwilligen Kräfte bei Finteis et al. [28] liegen, lässt sich auch bei ihnen ein Trainingsmangel annehmen. Ein weiteres Indiz für die mangelnde Fitness kann man in der Anzahl der Teilnehmer sehen, die nach dem Einsatz Herzfrequenzen von über 150bpm aufwiesen. Im Übungsszenario waren dies rund 30%, im Realeinsatz 14,6% der erfassten Einsatzkräfte. Eine mögliche Erklärung für den Unterschied zwischen den beiden Gruppen wäre die höhere Zahl wenig erfahrener Einsatzkräfte in der Übungsgruppe (44% zu 29% im Realeinsatz). Einer der Einsatzkräfte erreichte im Rahmen der Übung Herzfrequenzen, die über seiner persönlichen maximalen Herzfrequenz von 220bpm - Lebensalter lagen [95]. Bei Finteis et al. [28] traf dies auf 25% der Teilnehmer zu. Dieser Unterschied erklärt sich möglicherweise durch einen anderen Messvorgang. In der von Finteis et al. [28] durchgeführten Studie ist die Herzfrequenz der Teilnehmer kontinuierlich mittels Klebeelektroden überwacht worden. Somit konnte die Frequenz unmittelbar nach Verlassen des Containers erfasst werden. In der vorliegenden Studie wurden die Teilnehmer erst gemessen, nachdem sie den Atemanschluss abgeschraubt und die Maske abgesetzt hatten. Dies kann zu einer Verzögerung von ein bis zwei Minuten führen, was bereits zu einer leichten Reduktion der Herzfrequenz führen kann. Eine kontinuierliche Messung erfolgte nicht. Aus diesem Grund kann über die maximalen Herzfrequenzen während des Einsatzes nichts ausgesagt werden. Geht man aber davon aus, dass die Teilnehmer denen anderer Studien ähneln, ist anzunehmen, dass sie deutlich über den hier gemessenen Frequenzen liegt [28]. Die andere Art der Vorgehensweise kann auch erklären, warum in dieser Untersuchung nach der Übung 67,5% der maximalen Herzfrequenz erreicht wurde, wohingegen Finteis et al. [28] und andere Autoren mit kontinuierlicher Messung Werte bis 84% angeben. 23,8% der Übungsteilnehmer und 15% der Realeinsatzkräfte zeigten nach dem Einsatz Frequenzen, die über ihrer persönlichen Dauerleistungsgrenze von 75% der maximalen

Herzfrequenz lagen [95]. Ein anhaltendes Arbeiten oberhalb dieser Grenze wird als hohe kardiale Belastung gewertet, die unbedingt zu vermeiden ist.

Keiner der gemessenen-COHb-Werte ist als akut lebensbedrohlich einzuordnen, wenngleich man bei dem nichtrauchenden Teilnehmer mit einem COHb-Gehalt von 18% von einer CO-Intoxikation sprechen kann. Der Anteil derjenigen, die erhöhte Werte aufwiesen, scheint im Vergleich zur Gesamtanzahl der Teilnehmer eher gering. Dennoch muss auch diese geringe Anzahl beachtet und nach Möglichkeit weiter reduziert werden. Gerade weil sich eine beginnende CO-Intoxikation, wie auch im vorliegenden Fall, nicht sofort mit subjektiven Beschwerden bemerkbar macht, sollte die Gefahr einer Vergiftung von Beginn an so gering wie möglich gehalten werden. Da jede CO-Belastung potentiell kardiotoxisch sein kann und auch geringe Mengen CO bei intermittierendem Kontakt zu einer Intoxikation führen können, sollte die Belastung durch CO unbedingt vermieden werden [92]. Dies gilt insbesondere für die Übungssituation, in der ausreichend Zeit und Platz zur Durchführung aller notwendigen Sicherheitsmaßnahmen besteht.

So leitet sich aus den beobachteten Verhaltensweisen dieser Studie die Empfehlung ab, die Ausbildung der Atemschutzgeräteträger weiter zu optimieren und das Bewusstsein für das Durchführen von Sicherheitsmaßnahmen gerade im Realeinsatz zu stärken. Zum einen muss verstärkt auf das Vorhandensein körperlicher Fitness geachtet werden. Diese sollte möglichst über ein Dienstsportangebot aktiv gefördert werden. Zum anderen sollte die Aufklärung über die Gefährdung durch CO, aber auch andere Brandgase, ein integraler Bestandteil der Ausbildung werden. Des Weiteren sollten Sicherheitsmaßnahmen und Verhaltensregeln zur Vermeidung einer Intoxikation intensiver aktiv beübt und deren Beherrschen überprüft werden, so dass diese vor allem in der stressigen Einsatzsituation instinktiv beherrscht werden.

7 Schlussbetrachtung

Die Ergebnisse der vorliegenden Studie decken sich mit den Beobachtungen anderer Untersuchungen [28, 98] und geben darüber hinaus zusätzliche Erkenntnisse zur Kohlenmonoxidbelastung.

Eine kardiovaskuläre Belastung kann bei Feuerwehreinsatzkräften einerseits durch eine CO-Belastung und andererseits durch hohe körperliche Anforderungen bei mangelnder Fitness entstehen. Die vorliegende Studie kommt dabei zu ähnlichen Ergebnissen wie oben genannte Studien. Die gemessenen Herzfrequenzen liegen oft über dem, was als tolerabel betrachtet wird [28]. Da Feuerwehrangehörige ein -im Vergleich zur Normalbevölkerung- erhöhtes Risiko haben, an einem Herzinfarkt zu versterben und „Herzinfarkt“ heute die häufigste Todesursache von Feuerwehreinsatzkräften im Dienst ist [89], sollte die kardiovaskuläre Belastung durch CO unbedingt verringert und die körperliche Fitness erhöht werden [87].

Kein Atemschutzgeräteträger zeigte akut lebensbedrohlich erhöhte COHb-Werte, doch kam es sowohl während der Übung, als auch im Realeinsatz in einigen Fällen zu einer Belastung, die in zwei Fällen sogar medizinisch behandelt werden musste. Dies ist in Zukunft unbedingt zu vermeiden, da nicht nur akute Vergiftungen Folgeschäden haben können, sondern auch intermittierende Belastungen mit geringen Mengen COHb in chronischen Intoxikationen resultieren können, die langfristig relevante Symptome verursachen.

Diese Untersuchung zeigte bei Nichtrauchern signifikant höhere COHb-Werte im Realeinsatz im Vergleich zum Übungsszenario. Des Weiteren konnte beobachtet werden, dass gelehrt Sicherheitsmaßnahmen im Realeinsatz deutlich seltener befolgt und eingehalten wurden, als dies im Übungseinsatz der Fall war. Es mag ein ursächlicher Zusammenhang bestehen, der sich hier aufgrund des Studiendesigns weder eindeutig bestätigen noch widerlegen lässt. Eine gezielte Folgestudie mit verbesserten Sicherheitsmaßnahmen zur Überprüfung eines ebensolchen wäre wünschenswert.

Auch in Konsequenz der beobachteten, teils deutlich erhöhten, COHb-Belastung sollte in der Ausbildung von Atemschutzgeräteträgern und ihrer Führungskräfte künftig auf die Symptome und Gefahren einer CO-Belastung eingegangen werden. Um eine möglicherweise vorhandene CO-Belastung nicht zu verstärken, ist für jeden Ort, an dem ein Kontakt mit CO entstehen kann, eine Rauchkarenz zu empfehlen (siehe auch [89,

9)). Im Interesse der eigenen Gesundheit sollte an Einsatzstellen nicht geraucht werden. Übereinstimmend kommen auch die Autoren anderer Studien zu dem Ergebnis, dass die Kontrolle und die Reduktion selbst geringer COHb-Werte bei Feuerwehreinsatzkräften angestrebt werden sollte, um gesundheitliche Folgeschäden zu vermeiden [91].

Da im Realeinsatz eine verminderte Einhaltung der vorgeschriebenen Sicherheitsmaßnahmen beobachtet wurde, scheint es auch ohne direkten Nachweis einer Kausalität empfehlenswert, dass auf die Wichtigkeit derselben im Rahmen der Ausbildung vermehrt eingegangen wird.

Da die vorliegende Studie nur eine bedingte Aussage über die Unterschiede im Einsatz von Normal- und Überdruckmaskensystemen treffen konnte, wären weitere Studien bezüglich dieses Aspekt unter Einbeziehung größerer Fallzahlen in Zukunft wünschenswert.

Zusammenfassung

Kohlenmonoxid (CO) ist ein farb- und geruchloses Gas, das bei der unvollständigen Verbrennung von kohlenstoffhaltigen Substanzen in abgeschlossenen Räumen entsteht. Der bei Bränden in geschlossenen Räumen entstehende Brandrauch beinhaltet somit in hohem Maße CO, was dessen Toxizität maßgeblich beeinflusst. Enthält die Umgebungsluft Anteile von CO, so wird dieses gemeinsam mit der Atemluft in die Lungen eingeatmet. Im Körper wird CO mit einer 240fach erhöhten Affinität an das Sauerstofftransportprotein Hämoglobin gebunden. Daraus resultiert eine Gewebhypoxie, die akut zu Sehstörungen, Kopfschmerzen, Übelkeit, Schwindel, Schwäche, Thoraxschmerz, Erbrechen, Benommenheit, Kollaps- und Komazuständen, außerdem zu Krämpfen, Tachykardie, Tachypnoe und Schock führen kann. Chronische Belastungen erhöhen das Herzinfarktrisiko und können zu neurologischen Spätschäden führen.

Atemschutzgeräteträger sind Feuerwehreinsatzkräfte, die speziell für die Brandbekämpfung in geschlossenen Räumen ausgebildet wurden. Im Einsatz tragen sie eine besondere persönliche Schutzausrüstung mit einem Atemschutzgerät.

In der vorliegenden Studie wird untersucht, inwieweit Feuerwehrangehörige im Atemschutzeinsatz einer CO-Belastung ausgesetzt sind und in wie vielen Fällen eine erhöhte CO-Belastung unbeachtet bleibt. Des Weiteren werden Faktoren untersucht, die diese Belastung möglicherweise beeinflussen. Darunter finden sich sowohl physiologische Faktoren, Unterschiede in der persönlichen Schutzausrüstung, als auch die Frage nach individuellen Verhaltensweisen, die die Sicherheit der Schutzausrüstung beeinflussen. Es wird untersucht, ob sich die Sicherheitslage vom Training zum Realeinsatz unterscheidet. Dazu wurden über einen Zeitraum von 3 Jahren in den Landkreisen Marburg, Northeim und Göttingen Atemschutzgeräteträger nach Übungseinsätzen im Brandsimulationscontainer, beziehungsweise nach Durchführung eines realen Brandeinsatzes in die Studie aufgenommen. Mit Hilfe des Pulsoxymeters Rad 57 von Masimo wurden Carboxyhämoglobin, Herzfrequenz, Methämoglobin, Sauerstoffsättigung und der Perfusionsindex gemessen und über einen zusätzlichen Fragebogen Verhaltensweisen vor und nach dem Einsatz erfragt. Die erhobenen Messwerte wurden neben der deskriptiven Datenanalyse auch mittels verschiedener Hypothesentests ausgewertet. Im Übungseinsatz konnten bei 4,2% der Teilnehmer erhöhte COHb-Werte gemessen werden. Im Realeinsatz waren es 15,8%. Darüber

hinaus kam es im Übungseinsatz bei 20,2% der Probanden im zeitlichen Verlauf zu Messwerten, die auf das Einatmen größerer Mengen CO hinweist, ohne dass die absoluten Werte dabei in jedem Fall erhöht waren. Es zeigen sich statistisch signifikante Unterschiede des COHb-Gehaltes zwischen Übung und Realeinsatz. Dafür kann in einigen Fällen eine unterschiedliche Ausrüstung verantwortlich sein. Es zeigte sich aber, dass, vor allem im Realeinsatz, vorgegebene Sicherheitsmaßnahmen nicht so streng befolgt wurden wie im Übungseinsatz. Die Erhebung kardialer Parameter zeigte eine teilweise nicht ausreichende körperliche Fitness der Einsatzkräfte. Fazit dieser Studie ist, dass im Rahmen der Ausbildung in Zukunft verstärkt auf die Gefährdung durch CO an der Einsatzstelle und die essentielle Bedeutung von Sicherheitsmaßnahmen zur Vorbeugung der Exposition während des Einsatzes eingegangen werden muss.

Abstract

Carbon monoxide (CO) is a colorless gas, which arises from an incomplete combustion in an oxygen free surrounding. The main toxicity of fire smoke is due to CO. The inhalation of CO leads to an excessive binding of CO to hemoglobin because the affinity of CO to hemoglobin is 240 times higher than oxygen's affinity to the protein. A general hypoxia in nearly every tissue is the result. Hypoxia leads to dizziness, headache, nausea, weakness, convulsions, angina pectoris, collapse and coma. Chronic carbon monoxide intoxication increases the risk for heart failure and different neurological symptoms.

Fighting a fire in an oxygen free surrounding, as it can be found in burning houses, a special education of the fire fighters and special equipment is needed. The special equipment contains fire protective clothing, a protective mask and a compressed air cylinder.

In this study, fire fighters were surveyed in training surrounding and real fires. The question to be answered was whether the fire fighters show increased levels of carboxyhemoglobin even if they are protected adequately. The factors surveyed are physiological parameters as well as differences on personal protection equipment and specific behavior during operation. Finally, the data from training and real fires was compared.

From September 2008 to April 2011 about 170 fire fighters from the cities of Marburg, Northeim and Göttingen was measured either after a hot-fire training or after having taken part in a real fire fighting operation. With the pulsoxymeter Rad 57 by Masimo we measured heart rate, carboxyhemoglobin, oxygen saturation and methemoglobin. In addition to the physical data a standardized questionnaire captured the behavior before and after the operation. Especially safety procedures and whether safety checks were performed correctly were of interest. The measured data was analyzed with descriptive data analysis. The comparison of the different scenarios was analyzed with the Mann-Whitney-U-test. In the training scenario 4.2% of the study volunteers had an increased COHb-level. After the real fire operation 15.8% of the fire fighters showed an increased COHb-level. More than 20% of study volunteers in training showed a COHb trend that indicates that they have inhaled larger amounts of CO right before and after the training. There is a statistically significant difference between the COH- levels in training and after a real fire event. One reason for the increased level could be different safety

equipment. The analysis of the questionnaire showed that especially in real fire operations fire fighters do not stick to all safety regulations strictly. The measured data of the heart rates additionally shows that the fitness of the firefighters is not adequate in all cases.

This study shows that the knowledge about carbon monoxide and the possible risks connected to intoxication should be emphasized during training of the fire fighters. Additionally especially in real fire situations it should be paid more attention to safety regulations.

II Literaturverzeichnis

- 1; Argo, A.; Die Untersuchung nach G.26 aus arbeitsmedizinischer Sicht; www.atemschutzunfaelle.eu/gesundheit
- 2; Alarie, Y.; Toxicity of fire smoke; Critical Reviews in Toxicology 2002 Jul;32(4):259-89
- 3; Anderson, Jürina; Expression von Fibronectin (FN) in den Atemwegen und Lungen bei Brandtodesfällen; INAUGURAL – DISSERTATION zur Erlangung des Medizinischen Doktorgrades 2007
- 4; atemschutzunfaelle.eu; Unfälle/Europa/2000-2010; www.atemschutzunfaelle.eu
- 5; Ausschuss Krankenhaus nach §137c SGB V; Methode: Hyperbare Sauerstofftherapie (HBO) Indikation: Kohlenmonoxidintoxikation; Bundesanzeiger Nr. 72, Seite 7583 vom 12. April 2003
- 6; Balzan, M. et al.; Carbon monoxide poisoning: easy to treat but difficult to recognise; Postgrad Med J. 1996 Aug;72(850):470-3
- 7; Barnard, R. et al; Carbon monoxide: a hazard to fire fighters; Arch Environ Health. 1979 Jul-Aug;34(4):255-7
- 8; Barker, S. et al; Measurement of Carboxyhemoglobin and Methemoglobin by Pulse Oximetry A Human Volunteer Study; Anesthesiology 2006; 105:892–7
- 9; Barques, L.; Respiratory dysfunction in burned patients; Rev Mal Respir. 2005 Jun;22(3):449-60
- 10; Sportmedizin Ruhr Universität Bochum; Hämoglobin und Sauerstoffbindungskurve; http://vmrz0100.vm.ruhr-uni-10.de/spomedial/content/e866/e2442/e4446/e4451/e4497/index_ger.html
- 11; Bohnert, M. et al; Problems associated with diagnosis of vitality in burned bodies; Forensic Science International 2003 Aug 27;135(3):197-205
- 12; Boron, W.F. und Bonlpaep, E.L.; Transport of oxygen and carbon dioxide in the blood; Medical Physiology-second edition, Kapitel 29, S.679-684, Saunders und Elsevier Verlag
- 13; Boron, W.F. und Bonlpaep, E.L.; Synaptic transmission in the nervous system; Medical Physiology-second edition, Kapitel 13, S.331, Saunders und Elsevier Verlag
- 14; Brandschutzamt der Marburger Feuerwehr; Atemanschlüsse, Aufbau und Funktion eines Pressluftatmers; 2008

- 15; Breen, P.H. et al.; Combined Carbon Monoxide and Cyanide Poisoning: A place for Treatment?; Anesthesia and analgesia 1995, 80; 671-677
- 16; Bruce, EN et al; A multicompartment model of carboxyhemoglobin and carboxymyoglobin responses to inhalation of carbon monoxide; Journal of applied physiology 2003 Sep;95(3):1235-47
- 17; Bruce, MC et al.; Analysis of factors that influence rates of carbon monoxide uptake, distribution, and washout from blood and extravascular tissues using a multicompartment model; Journal of applied physiology 2006 100: 1171–1180, 2006
- 18; Buckley, N et al.; Hyperbaric oxygen for carbon monoxide poisoning : a systematic review and critical analysis of the evidence ; Toxicol Rev. 2005;24(2):75-92.
- 19;Chemgapedia,http://www.chemgapedia.de/vsengine/vlu/vsc/de/ch/8/bc/vlu/proteine/hemoglobin.vlu/Page/vsc/de/ch/8/bc/proteine/funktion_v_prot/sauerstofftransport/co_vergif.vscml.html
- 20;Coulange, M. et al.; Reliability of new pulse CO-oximeter in victims of carbon monoxide poisoning; Undersea Hyperb Med. 2008 Mar-Apr;35(2):107-11.
- 21; Daenens, P.; A case of carbon monoxide poisoning during skin diving; Arch Toxicol 31, S. 181-184
- 22; Deutscher Feuerwehrverband; Mitglieder des deutschen Feuerwehrverbandes; www.dfv.org , Kontakt: Hr.Pix
- 23; Deutsche gesetzliche Unfallversorgung; Arbeitsunfälle bei betrieblicher Tätigkeit (Betriebsart = Freiwillige Feuerwehren); Referat "Statistik - Makrodaten, Arbeits- und Schülerunfälle", Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV)
- 24; Deutsche Krebsgesellschaft; Rauchen- Zahlen und Fakten; http://www.krebsgesellschaft.de/rauchen_datenzahlenfakten,1050.html
- 25; Eckle-Kohler,J. und Kohler,M.; Erhebung von Daten-Eine Einführung in die Statistik und ihre Anwendungen, Springer Verlag, 1. Auflage, Kapitel 2, S.11-26
- 26; Firma Feurex; Vorstellung der Heißausbildung; Flyer der Firma Feurex, 2007
- 27; Freiwillige Feuerwehr Lissberg, Hessen; Aufbau, Funktion und Handhabung von Pressluftatmern; www.ff-lissberg.de/download/senioren/atemschutzgeraetetraeger/3.pdf
- 28; Finteis, T. et al; Stressbelastung von Atemschutzgeräteträgern bei der Einsatzsimulation im Feuerwehr-Übungshaus Bruchsal Landesfeuerweherschule Baden Württemberg (STATT

Studie)

29; Fisher, JA. et al.; Rapid elimination of CO through the lungs: coming full circle 100 years on; *Exp Physiol*. 2011 Dec;96(12):1262-9. Epub 2011 Oct. 3

30; Feuerwehrunfallkasse Baden-Württemberg; Unfallstatistik 2008 Unfälle im Feuerwehrdienst bei den Freiwilligen Feuerwehren 2008; www.uk-bw.de : Homepage der Unfallkasse Baden-Württemberg/Betriebsarten/Feuerwehr

31; Feuerwehrunfallkasse Baden-Württemberg; G 26 "Atemschutzgeräte"; Unfallkasse BW/abteilung Prävention

32; Feuerwehrunfallkasse Niedersachsen; Infoblatt G.26 Vorsorgeuntersuchungen; www.fuk.de/downloads

33; Feuerwehrunfallkasse Sachsen; Feuerwehrunfälle mit Gefährdung Atemgifte 1999-2010

34; Ausschuss Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung; Feuerwehrdienstvorschrift 7 "Atemschutz";

http://www.lfs.sachsen.de/download/lfs/fwdv_7_ausgabe_2002_mit_aenderungen_2005.pdf

35, Feiner, J.R. et al.; Accuracy of carboxyhemoglobin detection by pulse CO-oximetry during hypoxemia, *Anesth Analg*. 2013 Mar 11. [Epub ahead of print]

36, Freissmuth, M. et al., *Pharmakologie & Toxikologie*, DOI 10.1007/978-3-642-12354-2_63, © Springer Medizin Verlag Heidelberg 2012

37, Gestis-Stoffdatenbank des Instituts für Arbeitsschutz der deutschen gesetzlichen Unfallversicherung,

[http://gestis.itrust.de/nxt/gateway.dll/gestis_de/001110.xml?f=templates\\$fn=default.htm\\$3.0](http://gestis.itrust.de/nxt/gateway.dll/gestis_de/001110.xml?f=templates$fn=default.htm$3.0)

38; Golka; Fire Fighters, Combustion Products, and Urothelial Cancer; *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part B*, 11: 1, 32 — 44

39; Gorman, D. et al.; The clinical toxicology of carbon monoxide; *Toxicology*. 2003 May 1;187(1):25-38.

40; Gürlek,E. et al; Case Report: Kleptomania and Other Psychiatric Symptoms after Carbon monoxide intoxication; *Turkish Journal of Psychiatry*2007; 18 (1)

41; Unfallkommission Göttingen, Leiter:Moravec,O.; Abschlussbericht zum Einsatz Kellerbrand Oeconomicum Georg August Universität Göttingen; http://www.feuerwehr.de/download/Unfall_Goettingen_Bericht_der_Unfallkommission.pdf

- 42; Haponik, EF.; Clinical smoke inhalation injury: pulmonary effects; Occup Med. 1993 Jul-Sep;8(3):430-68
- 43; Hampson, N.B. et.al.; Outcome of patients experiencing cardiac arrest with carbon monoxide poisoning treated with hyperbaric oxygen; Ann Emerg Med. 2001 Jul;38(1):36-41
- 44, Hardy, KR. et al. ; Pathophysiology and treatment of carbon monoxide poisoning; Clinical Toxicology 1994; 32(6), S. 613-629
- 45; Harper, A.; Carbon monoxide poisoning: undetected by both patients and their doctors; Age Ageing. 2004 Mar;33(2):S.105-109
- 46; Heimbach,D.M. et al; Inhalation Injury; Annals of Emergency Medicine 17:12 December 1988:S.1316/99-1320/103
- 47; Hessische Landesfeuerweherschule; Atemgifte;
www.hlfs.de
- 48; Holmstedt,G. und Grahn,E.; Underventilerad Brand Report 3131 Lund 2004
- 49; Hörner; Handhabung des Pressluftatmers; www.hlfs.de
- 50; Jerrentrup, A. , Kill, C.; Das akute Inhalationstrauma; Notfallmedizin up2date6 3/2011;;S. 181-187
- 51; Jindal,S.K.; A health perspective of indoor air pollution; Indian Journal of medical research 126, November 2007, pp 409-411
- 52; Kafka, G. et al; Das Rauchgasinhalationstrauma in der präklinischen Versorgung; Notfall+ Rettungsmedizin 7 2007 · 10:529–540
- 53; Kaiser,G. ; Vergiftungen durch Kohlenstoffmonoxid (CO)-Grundlagen, Therapie und messtechnische Überwachung; Giftinformationszentrum Nord, Vortrag Arbeitskreis Ärztlicher Leiter Rettungsdienst Hessen 18.7.2012
- 54; Kales,SN; Carbon monoxide intoxication; American family physician. 1993 Nov 1; 48(6):1100-4.
- 55; Klink, R., Pape, H.C., Kurtz,A. und Silbernagel,S.; Der Transport von Sauerstoff im Blut; Physiologie, 6.Auflage, Kapitel 8.4, S.275-282
- 56; Klink, R., Pape, H.C., Kurtz,A. und Silbernagel,S.; Atemgastransport im Blut; Physiologie, 5.Auflage, Kapitel 10.6, S.284
- 57; Köthe,L. , Radke,J.; Carboxyhämoglobinkonzentration bei Kohlenmonoxidvergiftung-Kritische Betrachtung der prädiktiven Aussagekraft; Der Anaesthesist 2010 · 59:529–534

- 58, Lalande, S. et al.; Determination of blood volume by pulse CO-oximetry; Physiol Meas. 2012 Jan;33(1):19-27. doi: 10.1088/0967-3334/33/1/19. Epub 2011 Dec 7
- 59; Loke,J. et al; Acute and chronic effects of fire fighting on pulmonary function; Chest 1980;77;369-373
- 60; Macket,M.R. et al; Non-Invasive Measurement of Continuous Hemoglobin Concentration Via Pulse CO-Oximetry; Anesthesiology. 107; A1545.von www.masimo.com
- 61; Marius-Nunez, A.L.; Myocardial infarction with normal coronary arteries after acute exposure to carbon monoxide; Chest 1990;97;491-494
- 62; Firma Masimo; Nichtinvasive Kohlenmonoxidmessung im Blut; Informationsbroschüre der Firma Masimo 2008
- 63,Masimo, Operator's Manual Masimo Rainbow Set, Signal Extraction Pulse CO-Oximeter; http://www.infiniti.se/upload/Bruksanvisningar/Masimo/Rad-57/MAS_UM_EN_All_Rad-57%20OM.PDF
- 64; Mumma,B.E.; Neurologic recovery following cardiac arrest due to carbon monoxide poisoning; Resuscitation. 2009 Jul;80(7):835. Epub 2009 May 2
- 65; Nelson G.L. et al; Effects of carbon monoxide in man: exposure fatality studies; Elsevier Verlag, Kopie von subito e.V.
- 66; Olson, K. et al.; Carbon monoxide poisoning (acute); Clin Evid (Online). 2008 Jul 23;2008. pii: 2103.
- 67; Orellano,T. et al; Studies on the Mechanism of Carbon Monoxide Toxicity; JOURNAL OF SURGICAL RESEARCH 20, 485-487 (1976)
- 68; Penney,D.; Chronic CO Exposure; www.coheadquarters.com/CO1.htm
- 69; Pfeuffer, M.; MMH-Studie „Gefährdung durch Kohlenstoffmonoxid an der Einsatzstelle“, Feuerwehr Wiesbaden, Juni 2012
- 70; WDR Fernsehen, Teves, C.; Feuerwehr; http://www.planet-wissen.de/politik_geschichte/organisationen/berufsfeuerwehr/index.jsp
- 71; Pleß,G. und Seliger,U.; Forschungsbericht Nr. 145-ENTWICKLUNG VON KOHLENMONOXID BEI BRÄNDEN IN RÄUMEN TEIL 1
Forschungsbericht Nr. 145, Ständige Konferenz der Innenminister und -Senatoren der Länder
Arbeitskreis V - Ausschuss für Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung

- 72; Prockop, L.D. et al; Carbon monoxide intoxication: An updated review; Journal of the Neurological Sciences 262 (2007) 122–130
- 73, Riemann, J.F. et al.; Gastroenterologie-Das Referenzwerk für Klinik und Praxis; S.935-936 respiratorische Funktion; Georg Thieme Verlag KG, Stuttgart 2008
- 74; Rogde, S. et al; Characteristics of fire victims in different sorts of fires; Forensic Science International, 77 (1996) 93-99
- 75, Roth, D. et al; Accuracy of noninvasive multiwave pulse oximetry compared with carboxyhemoglobin from blood gas analysis in unselected emergency department patients; Ann Emerg Med. 2011 Jul;58(1):74-9. doi: 10.1016/j.annemergmed.2010.12.024. Epub 2011 Apr 2.
- 76; Rumsey, D.; Von Mittelwerten und Medianen; Statistik für Dummies, 1.Auflage 2004, Kapitel 5, S. 111-131
- 77; Rumsey, D.; Maße für die relative Bewertung von Ergebnissen; Statistik für Dummies, 1.Auflage 2004, Kapitel 8, S. 155- 170
- 78; Rumsey, D.; Achtung: Die Ergebnisse variieren!; Statistik für Dummies, 1.Auflage 2004, Kapitel 9, S.171-186
- 79; Rumsey, D.; Die Fehlergrenze berücksichtigen; Statistik für Dummies, 1.Auflage 2004, Kapitel 10, S. 187- 197
- 80; Rumsey, D.; Häufig benutzte Konfidenzintervalle; Statistik für Dummies, 1. Auflage 2004, Kapitel 13, S. 215-222
- 81; Rumsey, D.; Formeln und Beispiele für häufig benutzte Hypothesentests; Statistik für Dummies, 1.Auflage 2004, Kapitel 15, S. 247-260
- 82; Särqvist, S; Initial fires RHR, smoke production and CO Generation from single items and room fire tests; Lund University Sweden, Institut of technology department of fire safety engineering
- 83; Schröder, H. et al.; Belastungsstudie: Atemschutzgeräteträger müssen umdenken; brandSchutz · Deutsche Feuerwehr-Zeitung 5/2003, S.375-380
- 84, Shamir, M.Y. et al.; The Current Status of Continuous Noninvasive Measurement of Total, Carboxy, and Methemoglobin Concentration; Anesth Analg. 2012 May;114(5):972-8. doi: 10.1213/ANE.0b013e318233041a. Epub 2011 Sep 29.
- 85; Sheppard, D. et al; Acute effects of routine firefighting on lung function; American Journal

- of Industrial Medicine, Vol. 9, Issue 4, 1986, Pages: 333-340
- 86; Shirani,K.Z. et al; The Influence of Inhalation Injury and Pneumonia on Burn Mortality; Annals of surgery Vol. 205 * No.1
- 87; Smith,D.L.; Firefighter fitness: improving performance and preventing injuries and fatalities; Curr Sports Med Rep. 2011 May-Jun;10(3):167-72.
- 88; Sondergeld,C.; Metalle in Lebewesen- Ein Einblick in die bioorganische Chemie;http://online-media.uni-marburg.de/chemie/chids/veranstaltungen/uebungen_experimentalvortrag.html
- 89; Soteriades, e. et .al.; Cardiovascular disease in US firefighters: a systematic review; Cardiol Rev. 2011 Jul-Aug;19(4):202-15.
- 90; Stewart,R.D. et al; Rapid Estimation of Carboxyhemoglobin Level in Fire Fighters; Journal of American medical association, Jan 26, 1976-Vol 235, No 4
- 91; Svensson,S. et al; Hälsoeffekter på instruktörer orsakade av frekvent hypertermisk exponering; Brandteknik,Lunds tekniska högskola, Lunds universitet 2007
- 92; Takano, T. et al.; Direct effects of carbon monoxide on cardiac function; Int Arch Occup Environ Health 49. 35-40
- 93; Thomas,L.; Dyshämoglobine; Labor und Diagnose-Indikationen und Bewertung von Laborbefunden für die medizinische Diagnostik, 6. Auflage, Kapitel 15.5, S. 697-700
- 94, Touger, M. et al.; Performance of the RAD 57 pulse CO-oximeter compared with standard laboratory carboxyhemoglobin measurement; Ann Emerg Med. 2010 Oct;56(4):382-8. doi: 10.1016/j.annemergmed.2010.03.041. Epub 2010 Jun 3.
- 95; Trappe,H.J. und Löllge, H.; Leitlinien zur Ergometrie; Z Kardiol 89 S.1821-1837
- 96; Traber DL, Herndon DN, Enkhbaatar P et al. (2007) The pathophysiology of inhalation injury. In: Herndon DN (ed) Total burn care. Saunders, Philadelphia, p 248–261
- 97; Tredget,E.E. et al; The Role of Inhalation Injury in Burn Trauma - A canadian experience; Annals of surgery, December 1990, Vol.212, No.6, S 720-727
- 98; Wagner,N.L. et al; Mortality and life expectancy of professional fire fighters in Hamburg, Germany: a cohort study 1950 – 2000; Environmental Health: A Global Access Science Source 2006, 5:27 <http://www.ehjournal.net/content/5/1/27>
- 99, Walch, S.G. et al.: Schnellbestimmung von Carboxyhämoglobin in postmortal gewonnenem Blut mittels vollautomatisierter Headspace-Gaschromatographie mit

Methanisierung und FID; http://www.untersuchungsaeamter-bw.de/karlsruhe/org/abt1/l13co_blut.pdf

100, Weaver, L.K. et al.; False positive rate of Carbon Monoxide saturation by pulse oximetry of emergency department patients; Respir Care. 2013 Feb;58(2):232-40. doi: 10.4187/respcare.01744

101; Weaver, L.K.; Clinical practice. Carbon monoxide poisoning; N Engl J Med. 2009 Mar 19;360(12):1217-25.

102; Weaver, L.K.; Hyperbaric oxygen for acute carbon monoxide poisoning; N Engl J Med. 2002 Oct 3;347(14):1057-67.

103, 86; Werner, C.R. Makro- und Histomorphologie des Respirationstrakts von Brandeichen; DISSERTATION zur Erlangung des Medizinischen Doktorgrades der Medizinischen Fakultät der Albert-Ludwigs Universität Freiburg im Breisgau, 2003

104, Widdop, B.; Analysis of carbon monoxide; Ann Clin. Biochem 2002 39: 378

105, Wikipedia Gaschromatographie; <https://de.wikipedia.org/wiki/Gaschromatographie>

106; Winston, J.M. et al; Influence of carbon monoxide, hypoxic hypoxia or potassium cyanide pretreatment on acute carbon monoxide and hypoxic hypoxia lethality; The Journal of pharmacology and experimental therapeutics, Vol.193, No.3

107, Zaouter, C. et al.; The measurement of carboxyhemoglobin and methemoglobin using anon-invasive pulse CO-oximeter; Respiratory Physiology & Neurobiology 182 (2012) 88– 92

108; Zhang, J. und 75, K.; Indoor air pollution: a global health concern; British Medical Bulletin 2003; 68: 209–225

109; Zhang, J. und Piantadosi, C.A. ; Mitochondrial oxidative stress after carbon monoxide hypoxia in the rat brain; J Clin Invest. 1992 Oct;90(4):1193-9.

III Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: komplette persönliche Schutzausrüstung,(Quelle: Feuerwehr Bad Gandersheim)	10
Abbildung 2: Atemschutzmaske (Quelle: Feuerwehr Kevelaer).....	11
Abbildung 3: Pressluftflasche mit Tragegestell (Quelle: Feuerwehr Harsefeld)	12
Abbildung 4: Wärmegeöhnungsanlage (Quelle: Feurex)	15
Abbildung 5: Eindruck aus dem Brandraum (Quelle: Feurex).....	16
Abbildung 6: Hämoglobin (Quelle: Institut für Chemie TU Berlin).....	19
Abbildung 7: Porphyrinsystem (Quelle: Institut für Chemie Universität Erlangen)	20
Abbildung 8: Sauerstoffsättigungskurve (Quelle: Chemgapedia).....	21
Abbildung 9: Verschiebung der Sauerstoffsättigungskurve (Quelle: Hochschule Esslingen)	22
Abbildung 10: Häm-Gruppe mit gebundenem O ₂ Molekül (Quelle: Chemgapedia)	23
Abbildung 11: Häm-Gruppe mit gebundenem CO-Molekül (Quelle: Chemgapedia) ...	24
Abbildung 12: Prinzipieller Aufbau eines Gaschromatographen (1:Trärgas, 2:Injektor, 3: Säule im GC-Ofen, 4: Detektor, 5. Signalaufzeichnung) [Wikipedia Gaschromatographie]	32
Abbildung 13: Absorptionsspektren [Widdop]	33
Abbildung 14: Rad 57 (Quelle: Masimo)	35
Abbildung 15: Einsatzerfahrung Übungsgruppe	45
Abbildung 16: Einsatzerfahrung der Realeinsatzgruppe	46
Abbildung 17: Vorher-Werte der Nichtraucher (Übung)	47
Abbildung 18: Sofortwerte der Nichtraucher (Übung).....	47
Abbildung 19: 10-min-Werte der Nichtraucher (Übung).....	48

Abbildung 20: Vorher-Werte der Raucher (Übung).....	49
Abbildung 21: Sofortwerte der Raucher (Übung)	49
Abbildung 22: 10-min Werte der Raucher (Übung).....	50
Abbildung 23: exemplarische CoHb-Werte im Verlauf.....	51
Abbildung 24: Mediane der COHb-Werte aller Teilnehmer im zeitlichen Verlauf.....	52
Abbildung 25: Durchführung der Maskendichtprobe nach Aufsetzen der Flammschutzhaube Nichtraucher (Übung).....	54
Abbildung 26: Angabe zum Lüften der Kleidung Nichtraucher (Übung).....	54
Abbildung 27: Durchführung der Maskendichtprobe Raucher (Übung).....	55
Abbildung 28: Angaben zur Durchführung der Maskendichtprobe nach Aufsetzen der Flammschutzhaube Raucher (Übung)	55
Abbildung 29: Lüften der Kleidung Raucher (Übung)	56
Abbildung 30: Sofortwerte der Nichtraucher (Real)	57
Abbildung 31: 10-min Werte der Nichtraucher (Real).....	58
Abbildung 32: Sofortwerte der Raucher (Real).....	59
Abbildung 33: 10-min Werte der Raucher (Real)	59
Abbildung 34: zeitlicher Verlauf COHb-Werte im Realeinsatz (exemplarisch).....	61
Abbildung 35: Mediane im zeitlichen Verlauf (Realeinsatz)	61
Abbildung 36: Durchführung der Maskendichtprobe der Nichtraucher im Realeinsatz	63
Abbildung 37: Durchführung der Maskendichtprobe nach Aufsetzen der Flammschutzhaube der Nichtraucher im Realeinsatz	63
Abbildung 38: Lüften der Einsatzkleidung der Nichtraucher im Realeinsatz.....	64
Abbildung 39: Durchführung der Maskendichtprobe der Raucher im Realeinsatz	64
Abbildung 40: Durchführung der Maskendichtprobe nach dem Aufsetzen der Flammschutzhaube der Raucher im Realeinsatz	65

Abbildung 41: Lüften der Kleidung nach dem Realeinsatz Raucher	65
Abbildung 42: Mediane der COHb-Werte in verschiedenen Einsatzszenarien	67
Abbildung 43: Mediane der COHb-Werte unterschiedlicher Maskentypen	68

Anhang

Fragebogen

Fragebogen Einsatzkräfte (Einsatzort und Datum.....)

1.

Initialen des Geräteträgers: _____

2. Messwerte

	Vorher (<i>nur im Übungsfall</i>)	Direkt nach dem Einsatz	10min nach dem Einsatz
SpCO			
SpO ₂			
Herzfrequenz			
MethHb (<i>je nach Gerätetyp</i>)			

3. weitere Behandlung vorgenommen: ja nein

4. wenn ja, welche: _____

5. Geschlecht: männlich weiblich

6. Alter: _____ Jahre

7. Gewicht: _____ kg

8. Raucher: ja nein

9. Gerätetyp: Überdruck Normaldruck

10. Maskendichtprobe durchgeführt:

ja nein

11. wenn ja, nach dem Aufsetzen der Flammenschutzhaube?:

ja nein

12. nach dem Einsatz geraucht?:

ja nein

13. wenn ja, vor oder nach der Messung ?

ja nein

14. nach dem Einsatz Jacke gelüftet und ausgezogen?

ja nein

15. Einsatzdauer (unter PA):

_____ min

16. Luftverbrauch:

_____ bar

17. subjektive Einschätzung der Einsatzroutine/Erfahrung im Umgang mit PA

wenig erfahren

erfahren

sehr erfahren

18. Beschwerden nach dem Einsatz unter PA:

Luftnot .

Kopfschmerzen .

Sehstörungen .

Schwindel .

Verrußte Atemwege

Verzeichnis der akademischen Lehrer

Meine akademischen Lehrer waren Damen/ Herren in Marburg: Adamkiewicz, Aumüller, Cetin, Czubayko, Barth, Bartsch, Basler, Baum, Burchert, Daut, Fendrich, Feuser, Geks, Glatzl, Grundmann, Hertl, Höffken, Hörle, Hofmann, Kann, Kill, Klose, Koolman, Krieg, Langer, Lill, Lohoff, Mandrek, Michel, Meyer, Moll, Müller, Neumüller, Oertel, Pagenstecher, Plant, Renz, Röhm, Rucholz, Schade, Schmidt, Schneider, Steiniger, Vogelmeier, Vogt, Wagner, Werner, Westermann, Wulf

Danksagung

Dank Herrn PD Dr. med C. Kill für die gute Betreuung meiner Arbeit und die Möglichkeit mein Thema frei gestalteten zu können.

Besonderen Dank meinen Eltern, ohne deren Unterstützung dieses Studium nicht möglich gewesen wäre und Moritz, ohne dessen Geduld es diese Arbeit nicht geben würde.